



大修渣可持续 管理导则

终版

2020 年 2 月

www.world-aluminium.org

国际铝业协会（IAI）

目前，IAI 会员的铝土矿、氧化铝和铝产量占全球产量的 60%以上。自 1972 年 IAI 成立以来，IAI 会员公司一直从事铝土矿、氧化铝和铝的生产、铝的循环回收以及铝的制造，或以合资伙伴的方式参与此类工作。IAI 的主要目标是：

- 通过增强全球对铝的独特性和宝贵特征的认识来扩大铝市场；
- 针对普遍关注事宜为铝生产商提供全球论坛，与地区和国家铝业协会联络，以达成高效、有成本效益的合作；
- 识别与铝的生产、使用和循环利用相关联的问题，推广针对这些问题的适宜研究和其他行动；
- 鼓励和帮助铝在健康、安全和环保生产方面的持续进步；
- 收集统计信息和其他相关信息，并与行业主要利益相关方沟通，以及
- 就铝行业的观点、立场与国际机构和其他相关方沟通。

铝行业旨在通过 IAI 提高外界对其活动更广泛的了解，并通过可持续应用和铝的循环利用证明行业在铝生产方面的责任，以及待实现的潜在效益。

IAI 感谢以下公司对本导则的审核和贡献。

美国铝业公司（Alcoa Corporation）	欣达尔科工业公司（Hindalco Industries Limited）
云雀铝业公司（Aluminerie Alouette Inc.）	力拓铝业公司（Rio Tinto Aluminium）
阿联酋环球铝业公司（Emirates Global Aluminium）	托马戈铝业公司（Tomago Aluminium）
挪威海德鲁铝业公司（Norsk Hydro）	俄罗斯铝业联合公司（United Company RUSAL）

IAI 还感谢 IAI 大修渣（SPL）工作组以及斯蒂芬·布鲁克（Stephan Broek）（赫氏公司 HATCH）为本导则的制定做出的贡献以及地区协会、IAI 环境和能源委员会、IAI 沟通和推广委员会给予的支持。

免责声明：本出版物所包含的信息由 IAI 在其知识范围内提供，但并无担保。本出版物中列出的大修渣管理方法、系统和流程的应用超出了 IAI 的管理和职责范围，使用时应遵守所在地区和国家的监管要求。

大修渣可持续管理导则摘要

为了实现大修渣(SPL)的可持续管理，现提出以下指导方针：

长期计划

1. 制定 SPL 管理计划并形成文件。该计划聚焦对人类健康和环境的保护，使其免受与 SPL 产生、存储、装卸、处理、运输和处置相关的影响；
2. 针对 SPL 管理计划的每一阶段进行风险评估，以识别所有潜在的环境、社会、经济、健康和安全风险；
3. 制定管理和监控计划并形成文件，以缓解关键风险；
4. 制定 SPL 管理计划，考虑废物最少化的层级结构；
5. 制定一套结构化的、系统的流程，评估与特定管理选项相关的主要环境、社会和经济因素；
6. 考虑特定现场和情况的特定 SPL 管理问题（例如地区、监管制度、SPL 构成、当地机遇等）。

良好的治理

7. 在公司政策、程序、流程以及决策方面保持透明；
8. 负责管理公司内部所有阶段、不同层级的 SPL 活动；
9. 公开披露 SPL 管理计划、活动和绩效；
10. 遵守政府规定，取得所有必要的活动许可和批复。

健康和安全的

11. 使用基于风险的方法，理解和管理 SPL 的产生、装卸、存储、运输、处理和处置对健康和安全的的影响；
12. 开发一个系统，管理与 SPL 管理相关的健康和安全隐患并使其降至最低，控制 SPL 相关风险；
13. 确保所有工人和当地社区居民的健康和安全；
14. 确保所有工人具备足够的资质从事 SPL 活动，并配备了相关的设备、手册和协议；
15. 定期为工人提供健康和安全教育，支持他们从事相关活动；
16. 与社区、政府和应急服务机构共同制定应急计划，形成文件并遵照执行。

环境管理

- 17. 制定一个环境管理系统，以识别关键风险并概述这些风险的监控和缓解措施；
- 18. 遵守所有环境法规，此为最低要求；
- 19. 针对关键的环境风险进行基线评估、定期监控与报告。

存储、装卸和运输

- 20. 进行风险评估，以识别与存储、装卸和运输相关的潜在的环境、社会、经济、健康和安全风险，以及缓解这些风险的合适的系统；
- 21. 针对所有工人可进行的 SPL 装卸和运输工作制定一份协议并形成文件；
- 22. 就 SPL 存储、装卸与运输相关的具体程序对工人进行定期培训；
- 23. 在装卸和运输 SPL 以及任何危险衍生物时，遵守包括巴塞尔公约在内的所有适用的地区、国家和国际法律。

处理

- 24. 基于特定现场的问题考虑其商业解决方案和其适用性，例如：SPL 特征、现场位置、监管制度、当地行业机遇。

处置和填埋

- 25. 进行风险评估，以识别所有与处置或填埋相关的潜在的环境、社会、经济、健康和安全风险，以及监控和缓解这些风险的适当系统；
- 26. 与关联的利益相关者磋商，包括现场业主、监管部门以及地方社区，将对环境和人类健康的影响降至最低；
- 27. 遵守所有相关的法律和许可。

SPL 的应用

- 28. 基于特定现场的问题考虑 SPL 的各种应用选项以及他们的适用性，例如 SPL 特征、现场位置、监管制度、当地行业机遇；
- 29. 应尽可能扩大在其他行业应用中使用 SPL 的机会。

执行摘要



大修渣（SPL）可持续管理导则： 执行摘要1

- 所有行业都面临着如何更有效管理废物的压力。
- 铝业正寻求改善其废物管理的方法。
- 建立涵盖全行业的导则，识别出SPL有效管理计划的关键要素，离支持生产者实现可接受的低社会和环境的影响更近一步。
- 该导则汇总了近期出版的文献、案例研究和数据，以支持努力进行可持续废物管理，而非仅寻求最佳实践的铝生产商。



SPL可持续管理导则： 执行摘要2

SPL可持续管理并非“一刀切”——每个厂址的SPL构成、当地问题、环境条件、经济可行性、政府政策、监管框架以及社会因素都不同，在制定SPL管理计划时均需考虑。

通常情况下，SPL可持续管理需包含以下内容：

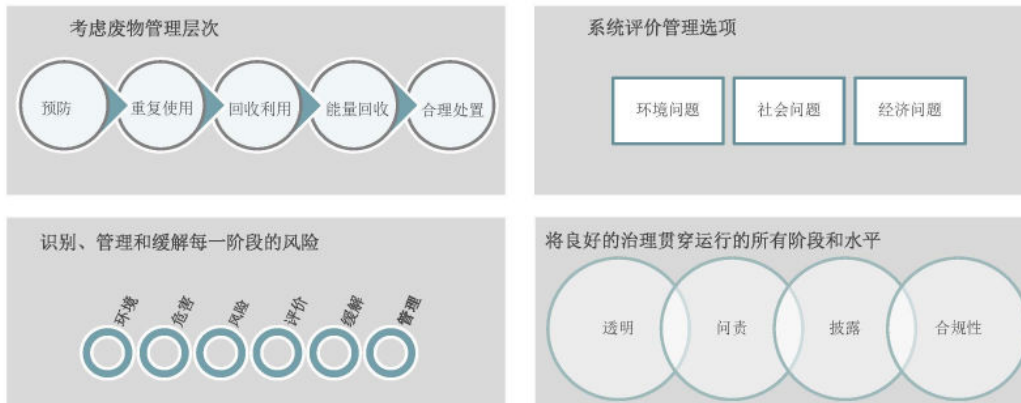
- 一份长期计划
- 良好的治理
- 健康&安全风险管理
- 环境影响管理
- 合适的存储、装卸和运输
- 合适的处理和/或填埋
- 尽可能实现SPL的使用最大化



SPL可持续管理导则： 执行摘要3

长期规划和治理

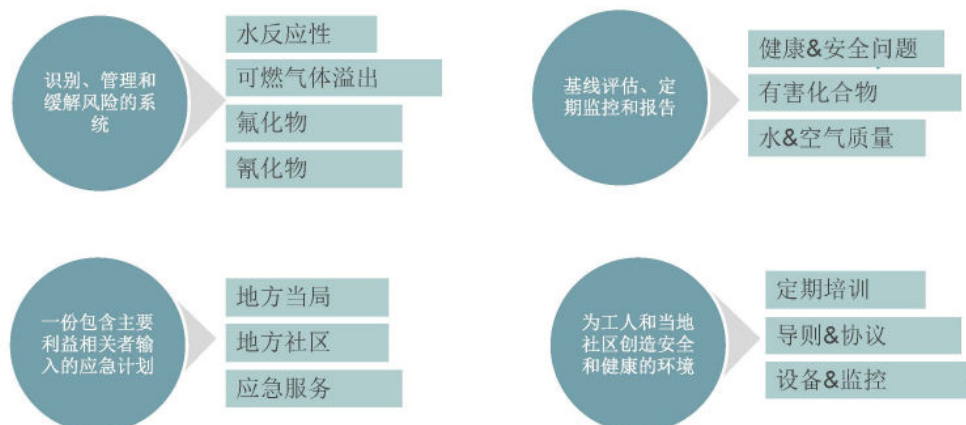
SPL的可持续管理应：



SPL可持续管理导则： 执行摘要4

健康、安全和环境

SPL可持续管理应包括：





使用&正在进行的研究

据估计，SPL年产生量的40-50%被回收利用或应用在其他工业流程中。



研究 & 其他举措: 真空处理、Oriens流程、等离子体熔融玻璃化、Engitec

目录

1.	引言和背景	10
1.1	宗旨和目标	10
1.2	SPL 的产生 & 术语	10
1.3	SPL 关键数据摘要	11
1.4	全球 SPL 活动地图——近期和当前活动快照	13
1.5	属性	15
1.6	特性描述 & 取样	15
2.	长期计划	20
2.1	制定废物管理计划	20
2.2	评估可持续性解决方案	21
3.	良好的治理	26
3.1	良好治理的关键因素	26
3.2	监管合规性	27
4.	健康与安全	28
4.1	健康与安全注意事项	28
4.2	程序和政策	29
4.3	特定职业健康危害和风险	29
4.4	应急	30
5.	环境管理和绩效	32
5.1	环境管理	32
5.2	氟化物	32
5.3	氰化物	32
5.4	碱性	33
6.	装卸、存储和运输	36
6.1	现场装卸程序	36
6.2	厂房存储	36

6.3	危险废物分类	40
6.4	《巴塞尔公约》管辖范围内的地区和国际运输	43
7.	处理	45
7.1	SPL 处理的不同方式	45
7.2	预处理-粉碎和研磨	46
7.3	Gum Springs 废物处理设施	48
7.4	力拓低碱浸出和石灰处理 (LCLL) 工艺	48
7.5	百菲萨 (Befesa)	50
7.6	Regain (公司名)	51
7.7	Weston 铝业	52
8.	处置和填埋	54
9.	SPL 的应用	58
9.1	在其他行业中使用 SPL	58
9.2	水泥	58
9.3	炼钢	62
9.4	矿物棉	64
10.	研究计划&其他进展	66
10.1	中国	66
10.2	真空处理	67
10.3	Oriens 工艺	67
10.4	等离子体玻璃化	67
10.5	意大利 Engitec (公司名)	67
11.	参考文件	69
12.	参考文献	70
13.	附录 A : 安全数据表示例	71

1. 引言和背景

1.1 宗旨和目标

所有行业都面临着废弃物有效管理的压力，铝业也意识到创立整个行业的可持续管理导则对于大修渣（SPL）的可持续管理是一项重要举措，以确保将社会 and 环境影响降低到一个可接受水平。

SPL 的可持续管理并非“一刀切”——本导则的目的是针对具体情况用最好的可用技术和方法帮助利益相关方管理风险。最适用的技术方法受当地气候、地理环境、经济可行性、政府政策、监管框架、社会因素的影响。

本导则总结了一系列当前及近期发布的文献，旨在关联所有产生 SPL 的铝冶炼厂，包括处理 SPL 的废物管理公司或该行业的终端用户。本导则适用于那些致力于废物可持续管理，而非仅仅谋求最佳实践的工厂、公司或用户。

SPL 是铝熔炼后最主要的固体废物，其产量在行业中仅次于铝土矿渣。本导则旨在明确 SPL 有效管理计划的关键要素，并为管理计划和实践提供信息及案例研究。本导则中的监测、风险和管理将不作单独陈述，这部分内容将编入导则的其他章节。

这些指导原则主要用于 SPL 的管理及其相关活动，包括熔炼厂员工、物流供应商、SPL 处理厂或处理供应商，以及使用 SPL 的行业，而这些内容也可用于其他利益相关方，如非政府组织（NGO）代表、当地社区和政府监管者。

1.2 SPL 的产生 & 术语

SPL 是原铝生产过程中形成的固体废弃物。原铝的生产使用霍尔-埃鲁电解法工艺，即在冰晶石、氧化铝和氟化铝的混合熔池中通入大电流，继而把铝和氧从氧化铝原料中分离出来。在碳衬钢槽（见图 1）里通过这一工艺可以生成熔融铝金属，该钢槽的内衬通常有两层：耐火内衬和里层碳衬。随着时间推移，电解槽内衬磨损，出现裂缝，导致电解槽液体金属渗漏。钢槽内衬在寿期末时（通常是在 4-7 年之后），就归类为大修渣（SPL）。SPL 通常是电解槽内衬所有材料的混合物，如今的趋势是将其分为两种不同内衬：首层刨除（碳内衬）和次层

刨除（耐火内衬）。虽说每个电解槽内衬的具体构成各不相同，但 SPL 通常由 55%的首层刨除碳块和 45%的次层刨除耐热材料构成。

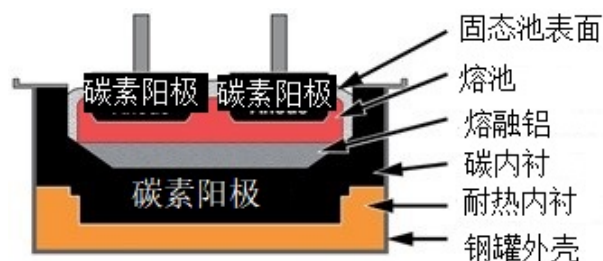


图 1：制铝槽横截面（Regain 2019）

铝广泛用于交通运输、建筑（屋顶、墙面、窗户门）、包装（罐、喷雾器、箔、纸箱）以及电气领域，因其质轻、结实、耐用、柔韧、防渗透、导热导电性能好、抗腐蚀的特点受市场青睐。到 2040 年，原铝需求强劲且将以每年 4%的速度增长。预计在此期间，原铝产品的增长会提高全球范围内 SPL（原铝生产过程中的产物）的总量。

SPL 术语总结

SPL（混合物）：未分类的（或未指定的）首层刨除和次层刨除的 SPL 组合。

首层刨除 SPL：富含碳元素的 SPL——主要在槽底和侧壁的上表层，通常由相对均匀且非常坚硬的材料混合而成，包括碳、氟和少量的氰化物。

次层刨除 SPL：耐火材料的 SPL——主要在槽底一层，相比较于首层刨除，次层刨除不太均匀，且氰化物和氟的含量低，其中有铝、二氧化硅，有时还会有铁。

1.3 SPL 关键数据摘要

2018 年原铝生产过程中产生了约 160 万吨 SPL（见图 2），与联合国估算的全球每年 5 亿吨有害固体废弃物相比，虽说所占比例很小，但却是铝电解过程中最重要的固体废物流，因此铝行业应该用恰当且可持续的方式管理这一问题。根据已发布的文献资料以及从 IAI 会员公司处收集到的数据，估计每年有超过 50%的 SPL 被无限期储存，或是填埋。其他管理 SPL 的方法包括处理之后作为直接原材料或燃料，用于如水泥或炼钢等其他工业。

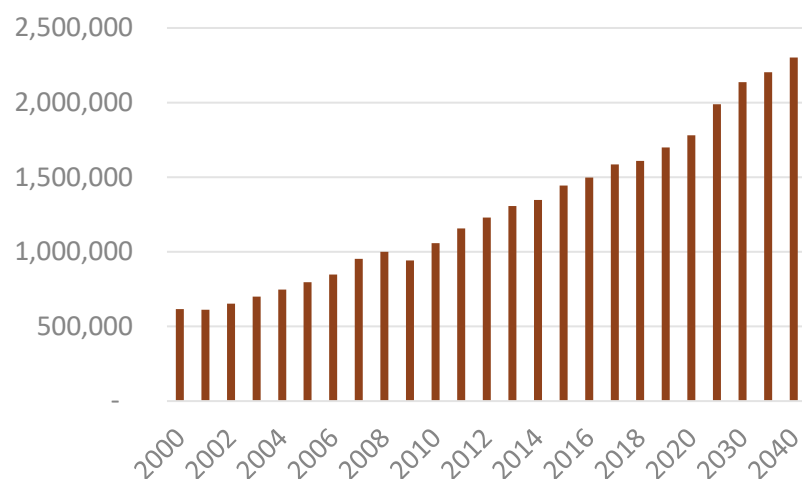


图 2：从 2000 年到 2040 年每年原铝生产所产生的 SPL 吨位估算（IAI 2017）

IAI 每年通过“可持续发展指标调研”直接从铝业收集相关数据；作为“生命周期清单调查”的一部分，每五年须进行一次与固体废弃物管理相关且更为全面的数据收集，包括 SPL 的产生和管理，尽管调查的响应速度和数据覆盖面有限，但是这些数据可用于估算全球 SPL 的产生情况。

1.4 全球 SPL 活动地图——近期和当前活动快照



地图由 S. Broek, Hatch 公司提供

指标	现有数据	来源
全球原铝产量（2018）	6400 万吨	IAI
原铝生产造成的固体废弃物（2018）	1.7 亿吨	IAI 生命周期清单
每吨原铝产生的 SPL（2015）	25 千克	IAI 生命周期清单
全球产生的 SPL	160 万吨	IAI 生命周期清单

1.5 属性

从钢槽里提取出的 SPL 呈灰褐色，从块状到粉尘大小不一。在制铝过程中，化合物渗入并在电解槽内衬里聚集导致其化学成分复杂多变。

SPL 的首层刨除和次层刨除通常均包含铝金属、金属钠、碳、氟化物、碳化物、氮化物、二氧化硅及氰化物，这些化学物质的存在使得 SPL 显现出其一些特征或属性。研究发现随着时间的推移其种类也会发生变化。首层刨除和次层刨除均包含有害化合物，之所以将 SPL 归类为有害废弃物，主要在于它含有氟化物和氰化物，而这些化合物的渗出对环境安全和人类健康构成了潜在的危害。SPL 还可以和水发生反应生成爆炸性气体，因为有碱金属和氧化物，SPL 的高 pH 值使其具有腐蚀性。

SPL 的密度一般是在 1.8 t/m^3 到 2.2 t/m^3 范围内，抗压强度平均为 20 到 30 Mpa，根据所用阴极类型不同，典型的最高强度约为 50Mpa。

1.6 特性描述 & 取样

每个冶炼厂的 SPL 特性各不相同，即便是同一冶炼厂不同批次其特性也不尽相同，表 1 概述了其化学成分的典型范围。确定 SPL 的化学成分绝非易事，SPL 多变的本质意味着采集代表性样本颇具挑战。为特性描述和分析而取样时，应考虑到各种因素，如电解槽内衬特定材料、电解槽的使用时长、拆下内衬或拆除程序等都会影响结果，因此现场应考虑选择哪种取样技术才是最适合的。

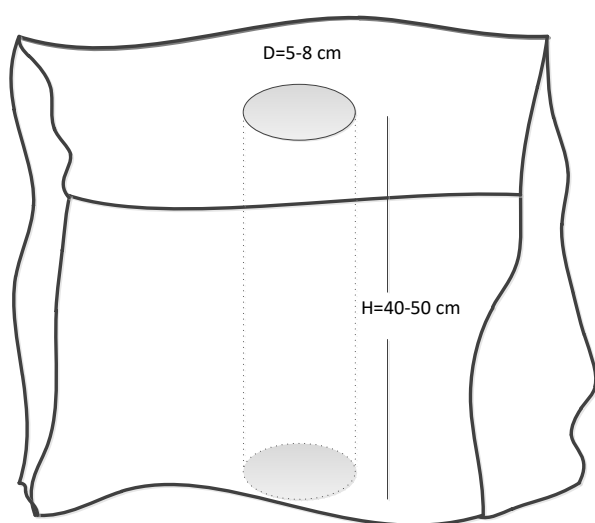
化合物	碳内衬 首层刨除 范围 wt %	耐热内衬 次层刨除 范围 wt %
Al₂O₃	0-10	10-50
C	40-75	0-20
Na	8-17	6-14
F	10-20	4-10
CaO	1-6	1-8
SiO₂	0-6	10-50
金属铝	0-5	0
共计 CN 量	0.01-0.5	0-0.1
无 CN	0-0.2	0-0.05

表 1：SPL 首层刨除和次层刨除的化学成分（海德鲁铝业，2018）

案例研究：用于 SPL 化学特性描述的取样技术和分析方法 - 挪威海德鲁铝业公司

为解决取样技术相关的一些困难，海德鲁铝业公司简要概括了两种方法，即尝试从单个电解槽阴极里收集代表性样本：

- 电解槽阴极和侧块取样进行岩芯钻探（图 3）
- 电解槽不同部位获取亚组分样品（图 4）



内芯样本尺寸

- 直径 = 6 cm
- 高度 = 45 cm
- 总体积: 1272 cm³
- 总重: ~2,8 kg

基于内芯样本的 SPL 首层刨除特性描述所需的总样本量

- 侧块（碳或碳化硅）: ~27 kg
- 阴极: 36 kg

图 3：电解槽阴极和侧块岩芯钻探取样示例

- 取自电解槽（已分类材料）不同部位，总重 360kg（3×120kg）的 3 个亚组分
- 分别压碎每个亚组分使其成为直径最大 5cm 的碎屑片
- 每个亚组分的不同部位取出 2×4kg 的材料，分别研磨成粉末状，颗粒大小 < 2mm
- 从 6 组细磨粉末中，每组抽取 2 个作为样本。
- 将样本分为两部分（50:50），一份用作分析，一份用作存档
- 分析样本（总共调查 6 个样本），必要的研磨 < 0.5mm
- 6 个参考样本存档以便日后调查研究

右侧是取样方案简图

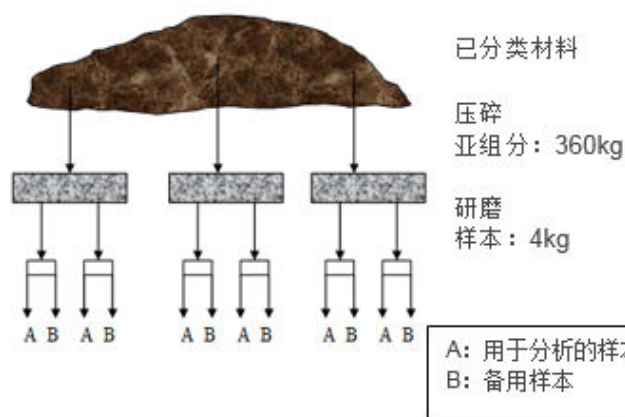


图 4：电解槽不同部位亚组分取样

海德鲁强调，即使采用这种有条不紊的取样方法，该技术也只能提供代表单个槽的样本—不一定能代表整个电解槽或冶炼厂的 SPL。为了对特定厂址的 SPL 开展全面的特性描述，需要采集大量样本，并分析其他参数，如电解槽内衬材料、运行时间等，这可能是一个密集且耗时的过程。

就 SPL 的水反应性和易燃气体的聚集可能性而言，取样程序可能具有挑战性。SPL 的强碱性和可能存在的硫化物也可能给取样带来挑战。

样本收集完毕后，尽管特征分析法是通过相关的 ASTM 和 ISO 标准建立而成，但其在实验室层面对能力和技能也有较高的要求，因为这也将对结果造成影响。

参数	报告单位	分析方法
S	wt%	ISO 9055: 1988
F	wt%	ASTM D3761 - 96 (2002)
Na	wt%	ASTM D 3682
Al	wt%	ASTM D 3682
Ca	wt%	ASTM D 3682
Si	wt%	ASTM D 3682
C	wt%	ASTM 3172/73
总氰化物	ppm or mg/kg	ISO 6703-1
游离氰化物	ppm or mg/kg	ISO 6703-2

飞灰	wt%	ISO 8005
热值	MJ/kg	ISO 1928
重金属和微量元素	mg/kg	HR-ICP-MS

表 2：SPL 特征分析法

2. 长期计划

2.1 制定废物管理计划

在编制 SPL 的长期管理计划时,在制定具体的行动计划之前必须考虑许多问题。风险评估在 SPL 管理计划制定过程中的各个阶段都是关键的一部分,应识别出所有潜在的环境、社会、经济、健康与安全风险,并制定管理和监测程序用于缓解风险。应记录并审查相关的背景信息,并阐明当前的状态或管理方法。最后,必须对计划开展定期审查,保证其具有适应性,以便随着政策、问题或风险的发展对其作出更改和路线修正。



图 5: 废物管理计划考虑因素示例

(改编自欧盟委员会, 2012)

一个可持续的 SPL 废物管理计划的关键原则与其他废物的管理原则相同,即注重保护人类健康和环境免受与 SPL 的产生、存储、装卸、处理、运输和处置相关的影响。SPL 废物管理计划应按照以下优先顺序来构建废物管理层级:

- 预防— 通过流程优化尽量减少废物的产生;
- 分类— 将废物分类以增加再利用或循环利用;
- 再利用— 将 SPL 作为一种资源加以利用;
- 回收利用— 使 SPL 适用于其他工艺;
- 能源回收— 把废物转化为可用的热、电或燃料; 以及
- 合理处置— 尽量减小其对环境 and 人类健康的影响



图 6: SPL 处置和废物管理层级（《今日国际铝业》，2018）

2.2 评估可持续性解决方案

解决方案是否“可持续”取决于多种因素，且每个厂址和情况各异。为了确定最适合的 SPL 管理实践，可借助于一个结构化、系统化的流程。比较好的作法是考虑与每个备选方案相关的环境、社会和经济问题。评估框架示例如下所示。

	方案A	方案B	方案 C
环境问题	分数	分数	分数
环境足迹	1 to 5	1 to 5	1 to 5
SPL的两层刨除物	1 to 5	1 to 5	1 to 5

	方案A	方案B	方案 C
消除有害化合物	1 to 5	1 to 5	1 to 5
社会问题			
工人健康安全	1 to 5	1 to 5	1 to 5
社区健康安全	1 to 5	1 to 5	1 to 5
监管链	1 to 5	1 to 5	1 to 5
经济问题			
SPL预处理成本	1 to 5	1 to 5	1 to 5
第三方加工成本	1 to 5	1 to 5	1 to 5
运输成本及其他费用	1 to 5	1 to 5	1 to 5
负债	1 to 5	1 to 5	1 to 5
对当地经济的贡献	1 to 5	1 to 5	1 to 5
分数	方案A总分	方案B总分	方案C总分

表 3: SPL 备选方案对比评估框架示例

(改编自 Broek 与 Øye, 2018 以及 Regain, 2018)

尽管表 3 中包含示例标准，但是这些准则并未指定特定标准，因为不同公司和厂址之间的关键标准会有所不同。在收集不同专业人士的意见制定标准时，必须采用协作的方法，从而确保一系列广泛的问题得到考虑。这些标准本身可以是以公司的废物管理政策为基准，或是与更广泛的目标相结合。该框架的目的是在纳入当地的具体问题方面提供灵活性，但在评估和评价方面提供一种有条理的方法。

长期规划

SPL 的可持续性管理应包括:

- 一份 SPL 管理计划文件，其重点是保护人类健康和环境免受与 SPL 的产生、储存、装卸、处理、运输和处置相关的影响；
- 一项为了识别出所有潜在的环境、社会、经济、健康和安全风险而对 SPL 管理计划的每个阶段展开的风险评估；
- 一些用于缓解关键风险的管理和监控计划文件；
- 一项考虑废物最小化等级的 SPL 管理计划；
- 一个用于评估与特定管理方案相关的关键环境、社会和经济因素的结构化、系统化的流程；
- 针对每个厂址和情况而考虑的 SPL 管理问题（如地区、监管制度、SPL 组成、本地机会）。

案例分析：战略合作伙伴—阿拉伯联合酋长国阿联酋环球铝业公司（EGA）

EGA 的 SPL 管理方法集中在两个关键领域：1）改善 SPL 设施和基础设施；2）建立战略合作伙伴关系，将 SPL 从无用的废物转变为有价值的原料。本案例重点研究 EGA 在过去十年中是如何发展战略合作伙伴关系，为 SPL 的回收开创新的市场和机会的同时，减少环境影响并为 EGA 和 SPL 顾客带来收益。

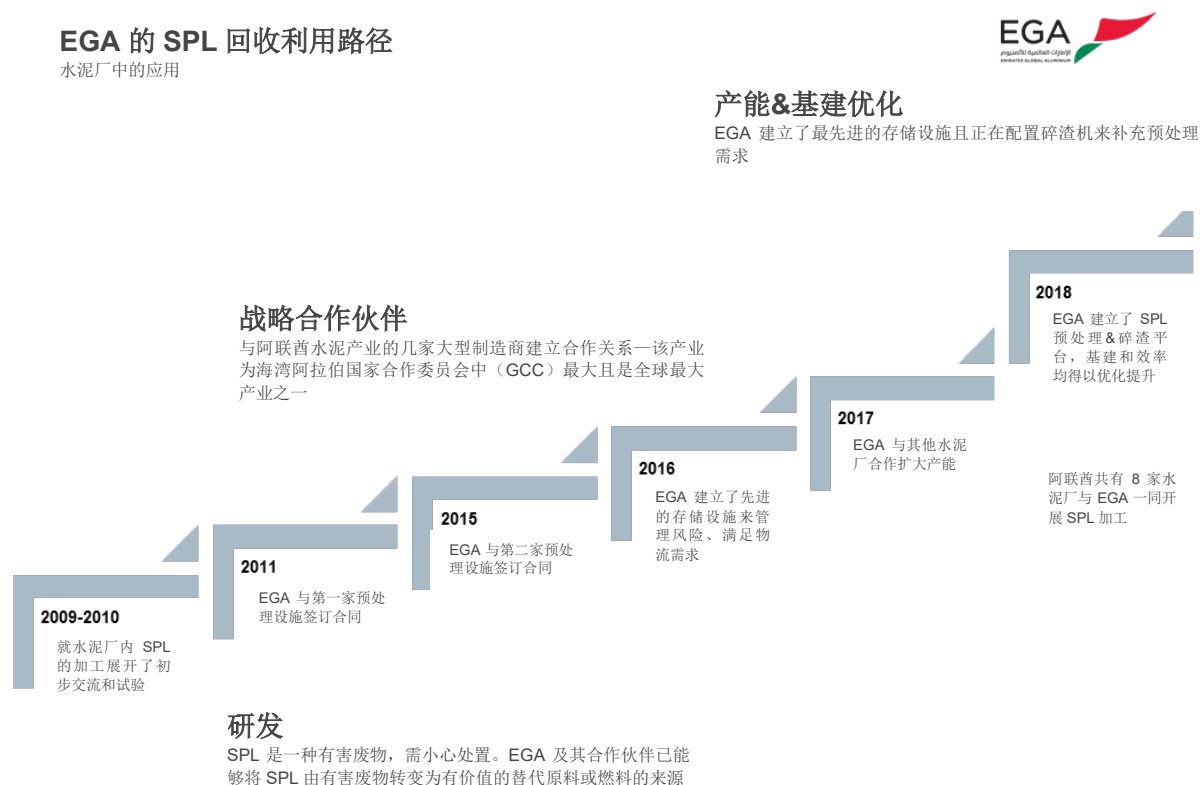


图 7：EGA 与阿联酋水泥制造商合作关系发展图(EGA，2018 年)

自 2010 年以来，EGA 与阿联酋的多家水泥公司合作，探索在水泥制造工艺中使用 SPL 的潜力以及该工艺可能从中获得的收益。SPL 中的碳减少了水泥生产过程中窑炉内的能源需求。同时，耐火材料降低了开采岩石原始原料的需求。最后，氟化物增加了硅酸盐水泥中的关键成分硅酸三钙石的形成。

2010 年至 2018 年期间，EGA 与阿联酋的几个主要水泥生产商建立了战略合作伙伴关系。这些战略合作伙伴关系和协议是从试验最初的合作尝试期发展而来，在此期间允许各方调整和完善流程和规范。随着时间的推移，由于合作被证实是成功的，EGA 即与该地区的水泥生产商建立了合作关系，他们这种直接与水泥公司建立战略关系的方法减少了对第三方 SPL 预处理机构的依赖。

EGA 与水泥公司之间的合作也非常符合《阿联酋 2021 年愿景》中的目标，该愿景旨在促进其他工业流程中废物的利用。目前阿联酋有八个水泥厂正在与 EGA 合作处理 SPL。认识到通过

战略合作伙伴关系在 SPL 的商业利用方面取得的进展，阿联酋气候变化和环境部长在 2017 年表达了对 EGA 和五家阿联酋水泥公司工作的认可。



图 8：EGA 的 SPL 基建投资以及近期因 SPL 在水泥中的应用方面的工作而获奖（EGA，2018）

案例分析：可持续业务框架和倡议—印度欣达尔科铝业公司（Hindalco）

印度 Hindalco 的母公司阿迪亚波拉集团（ABG）制定了集团可持续业务框架，其中包括固体和有害废物管理政策、技术标准和导则。ABG 意识到立法环境日趋严格，因此确定了其整个产业组合对于可持续性废物管理实践的需求，并致力于推动其公司朝着彻底消除废物的方向迈进。

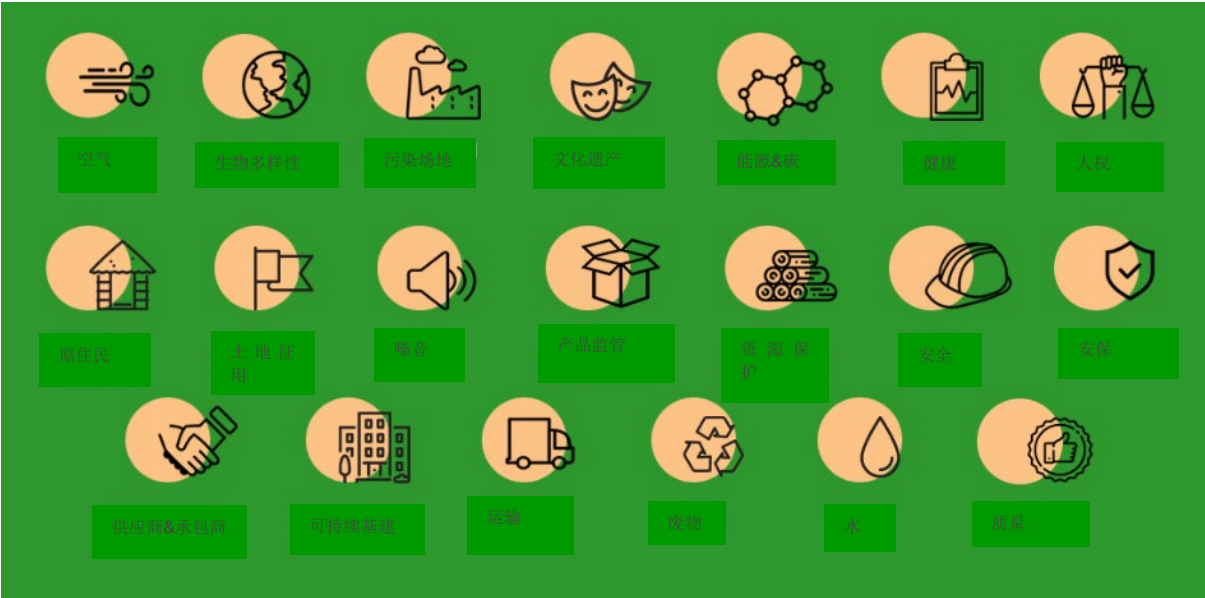


图 9：ABG 公司可持续业务框架（ABG, 2019）

根据 ABG 可持续业务框架的总体目标，Hindalco 提出了“发掘废物的价值”的倡议。Hindalco 的目标是到 2025 年实现 100% 的关键废物（包括 SPL）利用率，并为此制定了基于废物管理层级的废物管理计划。为了确定每个厂的最佳方法，每个厂都开展了自我评估，并绘制了热图以识别和帮助填补废物管理实践中的空白。同时也在进行废物清单的详细汇编，并审查了分类、储存、装卸和运输的基础设施要求。作为该倡议的一部分，已经确定了多种利用 SPL 以及其他工艺废物（铝土矿渣、飞灰和铝渣）的途径。

3. 良好的治理

3.1 良好治理的关键因素

治理涉及到机构如何处理业务事务和管理资源，它包括决策过程和实施这些决策的过程。透明度和问责制是良好治理的关键，而对责任方实行问责的关键在于信息披露。公司内部每个级别，从高级管理层到运营人员和承包商，对每个阶段的 SPL 活动各尽其责。良好的治理会对 SPL 活动的管理方式产生重大影响。

更广泛地说，良好的治理应包括：

- 一套适用于雇员、供应商以及公司与当局和其他干系人之间的关系的价值观和道德准则；
- 面向员工的有关透明度、问责制和道德操守的培训；
- 体系完备，确保符合所有法律和监管要求；
- 缴纳所有适用的地方、国家和区域税和关税；
- 建立和促进开放的沟通渠道，用于员工和其他干系人提供反馈、提出关切或讨论问题；
- 公开披露 SPL 管理计划、活动及绩效；以及
- 包括商业决策在内的各类公司政策和程序的文件齐备。

3.2 监管合规性

运营商必须负责遵守所有适用的地方和国家法律，并遵守政府监管机构制定的性能标准。国与国之间（有时国家内部）的法规要求都会有所不同。

SPL 活动通常不仅需要环境许可，在几个辖区内开展的危险废物分类活动也将意味着它必须遵守严格的法规。可能需要考虑的其他此类许可或批准可能包括：

- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| - 储存区域可行性研究批准 | - 风险评估 |
| - 许可证的社会影响评估 | - SPL 运输许可或批准 |
| - 与干系人和其他相关方的沟通计划 | - 在其他工艺或产品中回收利用或使用 SPL 的许可或批准 |
| - 土地使用许可 | |
| - 废物处理许可证 | |

良好的治理

可持续的 SPL 管理宜包括：

- 公司政策、程序、流程，包括决策在内的透明度；
- 公司内部各级别对各阶段的 SPL 活动各尽其责；
- SPL 管理计划、活动和绩效的公开披露；
- 遵守政府规定并获得所有必要的活动许可和批准。

4. 健康与安全

4.1 健康与安全注意事项

应对 SPL 管理相关的一切健康和安全风险和危险进行评估，以描述风险并为制定和实施合适的控制措施提供指导。这些应形成一份健康和安全计划文件，并可包括以下几项：

- 一般工作场所健康和安全
- 个人防护用品
- SPL 健康和安全培训
- 安全数据表 (SDS)
- 工作适合性
- 机械操作和保护
- 物理危险
- 危险废物
- 储存、装卸和运输操作
- 水反应
- 易燃气体逸出
- 通风储存
- 氰化物
- 氟化盐
- 呼吸性结晶二氧化硅粉尘
- 有毒气体释放
- 其他物质：氮化物、碳化物、磷化物、硫化物

应采取基于风险的方法来了解并管理 SPL 活动中潜在的健康和安全影响。应向员工提供相关指导和培训，确保其了解与 SPL 管理相关的健康和安全风险，并具备缓解这些风险的技能、策略和信息。公司应为员工提供安全健康的工作环境，采取一切实际且合理的措施消除工作场所的死伤和疾病，包括实施并维护一个健康和安全体系。该体系应包括：

- 一个根据所有相关国家标准，承认全体员工和承包商权益的健康和安全权益政策；
- 建立一个职业健康和安全管理体系，作为该政策的一部分。该体系应符合适用国家标准和国际标准（理想状态下），且必须致力于风险的辨识、管理、缓解和监测；
- SDS 数据表；
- 针对该体系的定期审查及国际标准认证，如 OHSAS 18001 或 ISO 45001；
- 现场健康和安全绩效评估和报告。

公共和社区健康和安全也应视为 SPL 管理计划的一部分。应使用监测和公共报告程序证明健康和安全的合规性并促进有关公共或社区健康和安全问题的讨论。

4.2 程序和政策

应对概述每个 SPL 活动相关的程序和政策的操作手册进行维护，并提供给全体员工和承包商。除提供书面手册外，员工和承包商还应接受在其责任或操作范围内的定期培训。建议在书面操作手册和操作员培训计划中包含以下几项：

- 操作员角色和职责
- 特定健康和安全风险
- 操作监控关键指标
- 个人防护用品
- 电解槽内衬拆除协议
- SPL 装卸和储存程序
- 储存设计安全特征
- 气体监测系统
- 计划内设备维护事项或事件报告协议

4.3 特定职业健康危害和风险

下文概述了一些与 SPL 活动相关的关键职业健康问题。与 SPL 相关的主要风险通常会在行业安全数据表（SDS）内进行概述-相关示例请见附录 A。《职业和环境医学杂志》（2014 年，Wesdock 和 Arnold）内对原铝生产相关的职业健康危险和风险进行了全面概述。

铍

铍天然存在于一些铝土矿中，并可在氧化铝原料中聚集。电解过程中，铍则集中于熔融的冰晶石电解液中，随后集中于电解槽槽壳和SPL中。所以，铝冶炼厂工人以及处理SPL的人员存在铍暴露的可能性。通过吸入含高浓度铍的粉尘和烟气会导致铍过敏（一种免疫介导反应）和慢性铍疾病（一种免疫介导肺病）。研究发现这些疾病在铝冶炼厂工人中的发病率非常低，与其他在工业流程中使用铍的行业相比，发病率也相对较低。应适当地对职业铍暴露进行监测和控制，例如：良好的通风环境和/或合适的个人防护装备(PPE)。

氟化物

SPL内的氟化合物大多来自电解过程中使用的电解质中的冰晶石和氟化钠。当SPL与酸接触时，它可释放有毒气体，其中包括氢化氟(HF)。吸入HF会对皮肤、眼睛以及上呼吸道造成刺激。

原铝冶炼厂内的哮喘疾病通常与氟化物暴露相关，但该结论还尚未确定。SPL与酸接触的相关风险应通过合适的储存及装卸协议进行管理，并且应对职业氟化物暴露进行监测和控制。

呼吸性结晶二氧化硅

SPL的装卸和加工过程（例如：磨削和干燥）中会产生呼吸性结晶二氧化硅。长时间或大量吸入呼吸性结晶二氧化硅粉尘可能会导致肺纤维化，通常称为矽肺病。矽肺病的症状包括咳嗽和呼吸困难。矽肺病患者患肺癌的相对风险也会增加，因此应建立适当的职业暴露管理体系，例如：通风良好的工作区域，合适的PPE及监测，将暴露控制在建议限值内。

4.4 应急

有效的应急响应对于公司保护员工、地方社区和其他干系人而言必不可少。所有 SPL 活动应具备应急行动计划，以确保发生事故时可采取合适的行动。及时且有效的本地响应对控制人员伤亡和财产或环境损失至关重要。应急行动计划应概述所需采取的步骤，以将健康和安全风险及对环境的影响降至最低。在制定应急行动方案时与责任方、地方或地区当局、当地社区和应急服务机构进行磋商不失为一个好方法。

应急行动计划应考虑：

- 可能导致应急事件的情况，例如：自然灾害、恶意行为、设备或系统故障以及可能直接受影响的区域/人员；
- 隔离人员和财产，使其远离危险的必要程序，包括报警系统或提醒人员注意相关事件的方案；
- 减小影响所需的当即行动，包括通知关键人员、疏散程序或清理计划；
- 提醒责任方、应急服务部门和其他部门的系统性方案；
- 责任方和工人所需的应急响应培训；
- 将综合 SDS 数据表落实到位并积极开展管理；
- 定期审查和更新过程。

健康和安全

SPL 的可持续性管理应：

- 采用一个基于风险的方法理解并管理 SPL 产生、装卸、储存、运输、处理和处置过程中的健康和安全影响；
- 包括一个用于管理并最小化 SPL 管理相关的健康和安全危险并控制 SPL 相关风险的系统；
- 确保所有员工和当地社区的健康和安全；
- 确保所有工人充分具备开展 SPL 作业活动的资格，配备相关设备、手册和协议；
- 为工人提供定期健康和安全培训，以支持其作业活动；
- 与社区、政府和应急服务部门合作编制、记录和执行一套应急计划。

5. 环境管理和绩效

5.1 环境管理

与 SPL 管理和环境相关的主要问题在于包括氟化物和氰化物在内的危险化合物浸出的可能性。同时还有 SPL 水反应和潜在易燃气体（氢气、甲烷、氨气、磷化氢）积聚带来的环境风险。

公司应对其 SPL 活动和基础设施进行评估，确保辨识所有环境风险，将所有的环境影响降至最低。应建立环境管理体系以缓解风险并管理环境问题。应以遵守所有环境许可和规定为最低要求。应将基准环境评估和下述项目的定期监测和报告作为 SPL 活动环境管理的一部分：

- 地表水和地下水水位和水质；
- 储存区内或附近地基土和岩石的水含量和地球化学；
- 空气质量和灰尘管理；
- 噪音水平评估（例如：粉碎或机械活动）；
- 储存场地适宜性，包括潜在的地质和水文特征；
- 气候条件和极端气象事件的可能性；
- 陆生和水生动植物调查和影响评价。

5.2 氟化物

SPL 两层刨除物中均含有氟化物，范围通常为 5-20wt.%。氟化物常常积聚于底部碳块与熔融氟化盐接触点处。有几个因素会影响 SPL 氟化物的浓度，包括：氧化铝质量、内衬质量和钢制电解槽使用年限。氟化物的主要环境管理问题与其浸出以及对地下水或周围环境污染的可能性相关。

5.3 氰化物

SPL 内的总氰化物浓度变化较大。SPL 的两层刨除物通常均存在氰化物，电解槽内的氰化物浓度变化不一。经常在侧壁处发现较高浓度的氰化物，那里的碳组分与空气接触，空气可通过阴极钢棒周围的缝隙穿透内衬。受氧化铝质量、电解槽使用年限或内衬拆除过程等多个因素影响，单个电解槽内的氰化物总量变化较大。氰化物的主要环境管理问题与其毒性、浸出及对地下水和周围环境污染的可能性相关。

5.4 碱性

由于存在穿透内衬材料或通过化学反应形成的碱金属和氧化物，SPL 的 pH 值较高。由于 SPL 为碱性，有几个环境方面的问题需要考虑。

主要的环境问题为水与 SPL 内各种物质发生反应。氧化钠（由钠与水反应形成）会在径流水中形成氢氧化钠，这使其极具腐蚀性。SPL 储存应考虑水与 SPL 的接触，应安装分流或集水系统确保将浸出和地下水污染风险降至最低。

即使是少量的雨水也会与 SPL 内的氮化物进行反应产生氨气。如果氨气在工人或群体人员所在地聚集，应建立相关风险管理系统。SPL 内的碳化物也会发生反应形成氢气，在受限空间中存在爆炸风险。反应所释放的其他气体，如乙烯，其管理方式和氢气相似。总之，因 SPL 的碱性而存在气体形成的可能性，这要求储存区域具备良好的通风。

环境管理

SPL 可持续性管理应包括：

- 一个辨识关键风险并概括监测和降低风险措施的环境管理体系；
- 需至少遵守所有环境法规；
- 基准评价以及关键环境风险的定期监测和报告。

案例分析：地下水和废水监测-加拿大力拓集团基蒂马特冶炼厂

(Rio Tinto KITIMAT, 加拿大)

SPL 是力拓集团基蒂马特冶炼厂产生的最多的有害废料之一。自 2018 年起，基蒂马特产生的所有 SPL 均被运至位于魁北克市沙格奈河(Saguenay)的力拓 SPL 处理厂。1989 年之前，根据许可限值，在填埋场处理了约 46 万立方米 SPL。1989 年秋天，该填埋场退役，最初用低透水性覆盖物封盖。在接下去十年里，三个分区用聚氯乙烯（PVC）衬里封盖。封盖层极大地减小了地表水渗透，降低了污染物对环境的污染。针对地下水质量和径流，实施了一系列监测方案。

地下水监测依照多媒介许可及 SPL 管理计划的相关要求开展。现有方案包含一个季度监测计划，通过选井监测水位趋势。除监测水位之外，每年秋季开展的地球化学取样活动也是年度计划的一部分。活动所收集的信息用于评估地下水质量，判断是否存在任何可能超过前一年结果的重大化学变化。

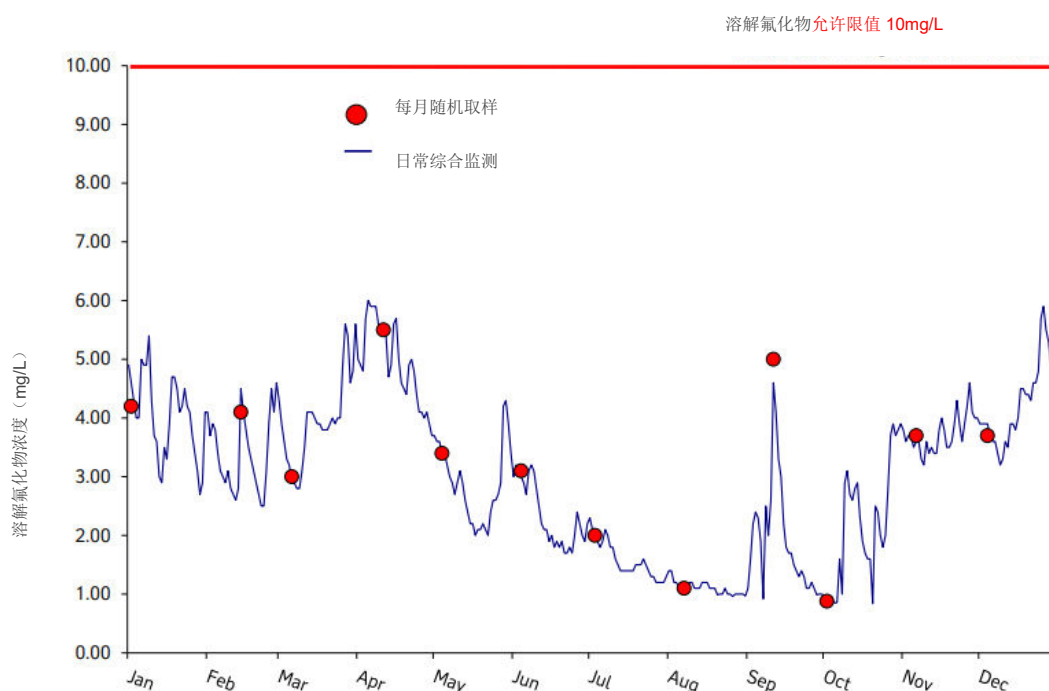


图 10：基蒂马特废水内溶解氟化物监测示例（2018 年力拓集团）

大部分的排放物源自融雪和雨水在冶炼厂厂区形成的地表径流。季节性降水差异显著，秋冬暴雨期每日总排放量可超过 100,000 m³。每年对排放物水质按照以下参数进行监测：流量变化、溶解氟化物、溶解铝、总悬浮固体（TSS）、氰化物、温度、电导率、硬度、毒性、酸度和多环芳氢（PAH）总量。上述参数中，溶解氟化物和氰化物是冶炼厂排放物水质的重要性能指标，因此对它们的长期趋势进行了监测。估计排放物中 50%的溶解氟化物来自填埋场（过去用于处置大修渣）的浸出物，其他的来自冶炼厂周围的原料损失。

通过每日复合取样和每月随机取样（如图 10 所示），持续监测溶解的氟化物。每日复合取样样本和随机取样样本送往外部实验室进行分析。许可证规定排放物中溶解氟化物的最大浓度为 10 mg/L，而 2018 年测到的浓度低于该水平，该年复合取样得出的平均溶解氟化物浓度为 3.02 mg/L。

地下水和 SPL 填埋场内衬底部的相互作用生成氰化物，其浸出液影响排出的水。根据许可证要求，排放物中强酸可分解氰化物（虽然毒性较小，但含量更高）的浓度不得超过 0.5 mg/L，该浓度由每月随机取样数据确定。如图 11 所示，强酸可分解氰化物的浓度低于许可证规定水平。虽然许可证未做要求，但也对弱酸可分解氰化物进行了监测。

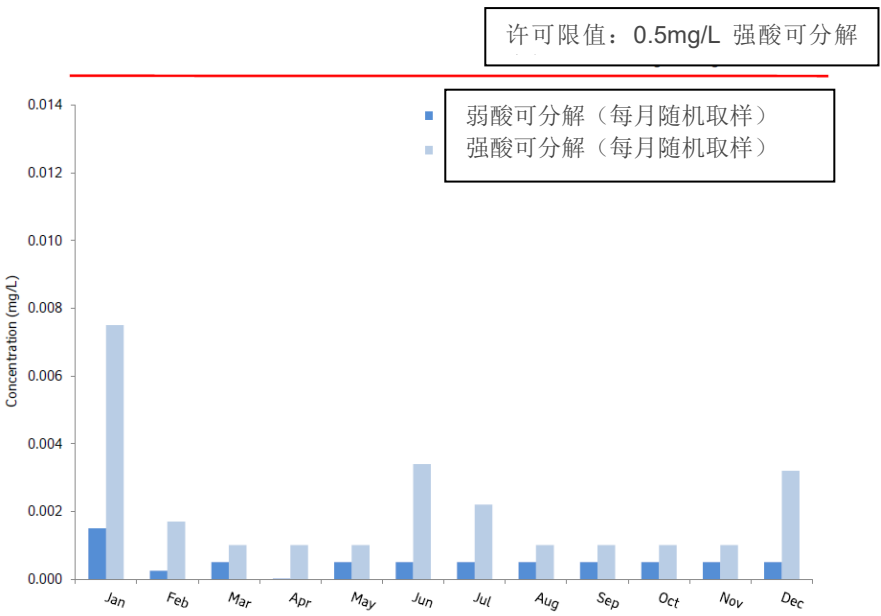


图 11: Kitimat 排放物中氰化物监测示例（力拓集团，2018）

6. 装卸、存储和运输

6.1 现场装卸程序

行业安全数据表（SDS）通常会概述现场装卸和运输的主要风险——见附录 A 示例。装卸 SPL 时应控制和防止危险物质的泄漏，降低其与水和酸接触后产生反应性风险。例如，应制定规程禁止恶劣天气下运输 SPL。

电解槽拆除后，通常将 SPL 装入标准废物容器（桶、滚装式容器、铁路车辆和油罐车）并运输至预处理加工区或存储区。使用的容器应标识清晰，提供充分覆盖以保持 SPL 干燥。还应考虑通风要求，防止可燃气体聚集。某些情况下，为了分别装卸首层刨除和次层刨除的 SPL，为这些容器设置指定区域或多个隔区可能会有所帮助。

公司应就 SPL 活动相关具体程序提供书面导则和培训。导则应包括：

- 安全数据表；
- 健康和安全程序，包括卫生；
- 通风管理和监测系统；
- 装卸和存储操作，例如，远离水、酸、碱和酷热；
- 水反应性和运输风险；
- 可燃气体管理和监测系统；
- 职业接触管理和监测（例如，氟化物和灰尘）。

6.2 厂房存储

开始清除内衬时，熔炼厂现场或附近的SPL专用存储厂房就可用于SPL的临时存储，直至其被运至处理设施或其他终点。应全面描述SPL材料的理化特性并评估拟议场地的合适性，例如水文、环境和社会风险，以此为依据规划SPL存储区。监管机构、当地社区/干系人应参与SPL存储厂房的规划。规划、设计和建造阶段应考虑以下特征：

防渗透厂房设计：

- **标高：**如果溪流、河流或干谷存在水位上升淹没厂房的风险，那么应将厂房建造在斜坡上，以最大程度地降低洪水风险。

- **地板设计：**必须防止与水直接接触，如果厂房进水，应有集水系统进行收集并绕开存储的SPL将水引流。SPL存储厂房的地板和边墙材料通常选用混凝土。设计应旨在降低泄漏风险——还可以在混凝土地板下面安装保护膜，将厂房和地面隔绝。应考虑开展水文研究，评估风暴潮和海平面上升的风险。
- **边墙设计：**为最大程度降低泄漏风险，墙壁可以与地板设计为一体。某些情况下，边墙最好采取独立式设计。如果设有机械通风，那么通常在边墙内安装将空气吹入建筑物的风机。
- **屋顶设计：**为确保存储的SPL保持干燥且通风良好，可设计沿边墙设有自然通风孔的悬挑屋顶。屋顶应有一定的倾斜度使水流走，通常应安装集水或改道系统以管理水流。

健康和安全系统&考虑：

- **粉尘管理系统：**应采取预防措施减少接触 SPL 产生的粉尘，包括为进入厂房的人员提供口罩和其他相关 PPE。封闭 SPL 存储和加工区可降低粉尘进入环境的风险。在存储区内部，使用粉尘过滤器可以管理空气质量，降低粉尘暴露风险。离开存储或清除内衬设施时冲洗卡车和移动设备等简单的解决方案也有助于管理粉尘。
- **气体监测：**应设计厂房通风，保障有足够的空气流动以最大程度地降低甲烷和氢气浓度。应开展风险评估，确定 SPL 存储吨位的相关风险。应对危险区域进行分类。旨在存放大量 SPL 的存储区应安装气体探测系统（风险评估和危险区域分类另有说明的除外），监测是否存在有毒或可燃气体，以在气体浓度超过可接受限值时向工作人员发出警报。某些情况下，这些监测系统可启动自动响应，改善空气循环。
- **电气系统：**除非风险评估和危险区域分类另有说明，否则应尽可能减少 SPL 存储厂房内的电气设备数量，以降低 SPL 产生的可燃气体的演变风险。如果 SPL 存储厂房被划分为 2 区——危险区域（ATEX/IECE_x），那么厂房内的电气设备应尽可能达到防爆等级。
- **防火防爆：**存储厂房内应安装防火系统。SPL存储区只允许使用干式灭火方法（包括 CO₂灭火法），与当地消防部门沟通时应说明SPL特有的火灾风险性质。

案例研究：SPL 存储厂房设计——阿联酋环球铝业公司（EGA），阿联酋



图 12：EGA SPL 存储设施（EGA 2019）

2016 年，EGA 在哈利法（Khalifa）工业区的 Al Taweelah 厂址建造了一座新的 SPL 存储厂房，存储容量为 50000 公吨，旨在协助 EGA 开展 SPL 加工和回收相关的风险管理和物流工作。

作为厂房规划和设计过程的一部分，委托开展的厂房评审研究概述了建造长期存储设施的风险和危害。研究关注两项关键风险：SPL 存储厂房内部有毒气体释放可能性和爆炸可能性。

厂房设计包括研究中强调的众多安全性能，研究认为这些性能是可将风险降至最低的必要技术特征。厂房设有自然和机械两种通风系统，确保有足够的气流，使甲烷和氢气保持在合适的浓度并防止气体聚集。机械通风系统相当于每小时提供两次换气，如果气体浓度超过安全水平，气体检测系统会发出警报提醒工作人员。该系统的自动响应功能可以基于设定的爆炸下限（LEL）水平启动机械通风。

还采取了多种预防措施，降低渗水或接触 SPL 存储物的风险。厂房、墙壁和地板都是防水的。存储设施的基础建造在路面上方约 0.5m 处，以降低任何地表径流或暴雨渗透风险。

案例研究：临界和风险评估——阿联酋环球铝业公司，阿联酋

2016年，在Al Taweelah厂址新建SPL存储厂房的规划阶段，EGA委托开展了一项研究。研究包括两个事故场景下的风险分析：有毒气体释放和厂房爆炸。根据阿布扎比导则开展了该风险评估，并基于下列因素确定了风险分级：

1. 危害的后果（例如，危害的严重性以及对土地、水生环境、大气、文化和遗产、现场生产和经济/金融的影响）
2. 发生概率（例如，罕见、可能、很有可能、经常或频繁）

概率	后果				
	很小（1）	轻微（2）	中等（3）	重大（4）	灾难（5）
1 罕见	1	2	3	4	5
2 可能	2	4	6	8	10
3 很有可能	3	6	9	12	15
4 经常	4	8	12	16	20
5 频繁	5	10	15	20	25
15-25	极端风险	活动或行业不应以现有形式继续推进。			
8-12	高风险	应改变活动或行业，增加补救方案和行动，并进行详细的EHS评估			
4-6	中风险	经过管理或修改后，活动或行业可继续运行。			
1-3	低风险	无需行动，除非风险可能升级。			

图 13：临界指标：基于事件/事故概率和后果的风险分级（EGA，2016）

通过利用临界指标框架（图 13），研究得出以下结论：

- 在最坏的情况下，认为 SPL 厂房有毒气体释放对现场工人构成中等风险（4 至 6 级）。
操作员穿戴合适的 PPE，装载机的驾驶室设置为封闭，并将厂房警报水平设定为 25ppm NH_3 ，能够降低暴露于粉尘和氨的风险。

认为 SPL 厂房爆炸为低风险水平（1 级）——视作罕见事件。厂房所在位置不会对附近居民或设施构成风险，并可以利用厂房设计特点来缓解风险，以确保合理进行风险管理。第 400 号 NFPA 标准也对 SPL 厂房爆炸进行了分类，为“1 级水反应性”。

6.3 危险废物分类

许多国家将大修渣划分为危险废物。多数情况下，这种分类意味着 SPL 在存储或处置前应进行进一步处理。处理标准主要涉及氯化物的销毁和 SPL 中氟化物的回收，以尽可能降低浸出和地下水污染相关风险。某些情况下，危险废物分类和后续管理规程仅在废物离开生产场地后才适用。下文列述了几个主要国家和国际组织 SPL 危险废物分类的详细情况。

澳大利亚：澳大利亚各州均将 SPL 划分为危险废物，应在填埋之前接受处理并/或取得所需的处置许可/批准。表 4 概述了澳大利亚当前的 SPL 废物分类情况：

最相关的立法	各辖区 SPL 危险分类				监管结果
	首层刨除后的 SPL	依据	次层刨除后的 SPL	依据	
新南威尔士州 《环境运行（废物）保护规定》 2005	危险废物	• 澳大利亚公路和铁路危险货物运输 (ADGC), 4.3 章 • 氟化物	危险废物	• ADGC 4.3 章 • 氟化物	首层刨除和次层刨除均不可以直接填埋。在填埋前，必须获得固定处理许可，并需要对 SPL 进行化学处理，以降低 SPL 的危险性能。
昆士兰州 《环境保护规定》 2008	受监管废物	• ADGC 4.3 章 • 氟化物, 氰化物	受监管废物	• ADGC 4.3 章 • 氟化物, 氰化物	QLD 的受监管废物。各填埋场的许可条件决定了 SPL 的验收。
塔斯马尼亚州 《环境管理和污染控制（废物管理规划）》 2010	受控废物	• ADGC 4.3 章 • 氟化物	受控废物	• ADGC 4.3 章 • 氟化物	处理受控废物需要获得环境保护局局长的批准。
维多利亚州 《环境保护规定的工业废物资源》 2009	规定的工业废物，A 类	• ADGC 4.3 章 • 氟化物	规定的工业废物，A 类	• ADGC 4.3 章 • 氟化物	首层刨除和次层刨除均不可以直接填埋。必须进行固定或其他处理以消除/减少危险。

表 4：澳大利亚当前 SPL 废物分类概述（2016 黑皮书）

加拿大：鉴于 SPL 含有可浸出有毒物质（氟化物和氰化物）以及和水的反应性，加拿大各省将 SPL 划分为危险物质（见《魁北克危险物质规定》（Q-2, r. 15.2））。联邦政府除了协商化学品和废物相关的国际协议，还监管危险废物和危险可回收材料的越境转移。各省和领地政府除了控制辖区内的废物转移，还建立了危险废物生产、运输和处理设施的取证措施和准则。根据《加拿大危险品运输计划》，SPL 被划分为 4.3 级危险废物，其运输名称为 “UN, 3170, 铝冶炼副产品（大修渣），4.3 级，包装 III 级”

在联邦政府层面，SPL 列入了《危险废物和危险可回收材料进出口规定》的附表 4（第 104 项）。该规定与其他两个规定（《危险废物跨省转移规定（SOR/2002-301）》和《PCB 废物

出口规定》1996（SOR/97-109）将纳入拟议的《危险废物和危险可回收材料跨境转移规定》（预计于 2020 年出版）。

中国：在中国，《国家危险废物名录》由政府维护。在名录中，废物代码为 321-023-48 的 SPL——铝电解过程中电解槽维修和处置产生的废渣，被归类为有毒危险废物（T）。《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2001）规定了危险废物贮存的一般要求，包括场址选择、场址设计、运行、安全、监督和场址封闭的要求。它不仅涵盖危险废物的包装和贮存设施，还包括危险废物的再利用或解毒过程及其最终处置之前的处理方法。《危险废物填埋污染控制标准》（GB18598-2001）规定了填埋标准，包括选址、场址设计、运行、封闭和填埋危险废物时的环境监测。

欧盟：按照第 94/904/EC 号（后被 2000/532/EC 号代替）欧盟理事会决议，制定了欧盟危险废物清单（“废物清单”）。2008 年，2008/98/EC 号令对某些属性进行了更新。在当前的《欧盟废物目录》中，SPL 废物代码为 16.11.01 和 16.11.03，即冶金过程中产生的含危险物质的碳基内衬和耐火材料，及冶金过程中产生的含危险物质的其他内衬及耐火材料。

印度：在印度，SPL 被列于过程危险废物清单中，其废物代码为 11.2，即阴极残留物（包括大修渣）。它是一种可浸出有害成分的 A 类材料，且浸出液中每种成分的浓度均有一定的限制。对于氟化物（A8）和氰化物（A15），该限值分别为 150mg/L 和 5mg/L。

美利坚合众国：1998 年，美国 EPA 根据《美国联邦法规》第 40 小节，第 268 部分《土地处置限制》（LDR）计划将 SPL 归类为危险废物，该决定意味着不再允许对未经处理的 SPL 进行填埋，在处置前，必须对 SPL 进行处理以设定氟化物和氰化物的标准。在《美国联邦法规》第 40 篇，SPL 被标记为废物 K088；在子部分 D 第 261.32 小节，SPL 被列为特定危险废物。

巴塞尔公约：对于危险废物（包括 SPL）的所有越境转移，如将 SPL 运送到其他国家，《巴塞尔公约》签署国均应遵守该公约。根据该公约，SPL 被归为 A4050 类废料——含无机氰化物的废料。

联合国：联合国危险货物运输专家委员会给 SPL 分配的代码是 UN3170，属于第 4.3 子类，用于标记卡车运输的集装箱，这已被所有允许运输 SPL 的国家普遍采用。

6.4 《巴塞尔公约》管辖范围内的地区和国际运输

在许多司法管辖区中，SPL 被归类为危险废物，这意味着需对冶炼厂场址以外 SPL 的运输进行严格监管。计划运输 SPL 时，应将与危险物质转移相关的主要风险视为风险评估的一部分。在装载、运输和卸载过程中溢漏风险很高，场外运输问题需作为运输计划的一部分予以考虑：

- 正确包装，包括采用密封集装箱
- 给集装箱和运输车辆贴上标签
- 装卸设备
- 运输车辆规程
- 运输技术能力
- 取证和许可
- 应急预防措施和程序

由于 SPL 被归类为危险废物，应受《控制危险废物越境转移及其处置巴塞尔公约》约束。发现发展中国家倾倒有毒废物后，瑞士巴塞尔全权代表大会于 1989 年通过了《巴塞尔公约》。该公约旨在保护人类健康和环境免受危险废物的不利影响，于 1992 年获得批准，当时有 20 个国家加入。截至 2018 年，186 个国家和欧盟都加入了该公约。

SPL 应受包括《巴塞尔公约》A4050 条目（关于含无机氰化物的废物）的琥珀控制程序的规则约束。在氰化物被销毁的情况下，鉴于 SPL 中无机氟化合物的含量，其代码为 AB120。

在大多数管辖区，SPL 跨境运输都受到严格监管。每批 SPL 都应遵守所有当地、国家和国际法律，并且作为 SPL 管理计划的一部分，应制定程序以确保考虑以下问题：

- 各方的取证&授权状态（进口商、出口商、授权贸易商）
- 每批 SPL 货物的有效书面合同&财务担保
- 通知程序，包括主管当局的通知
- 追踪程序&转移文件
- 确认收货程序
- 主管当局的反对意见，包括各方分歧的分类和说明

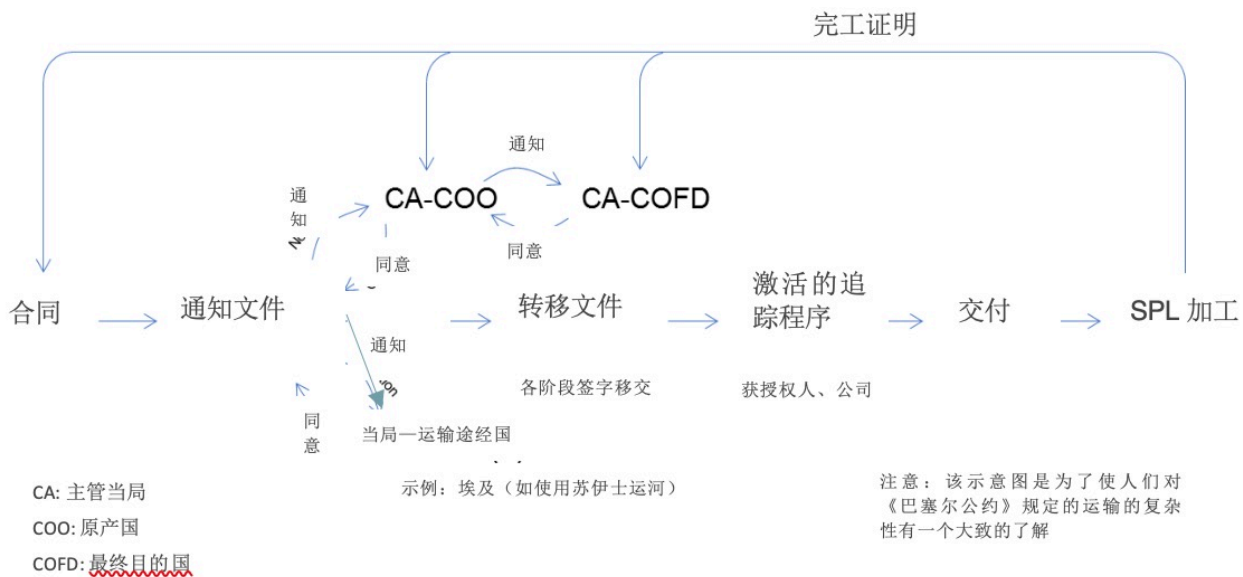


图 14：根据《巴塞尔公约》规定的 SPL 运输的复杂性示意图（Hatch, 2017）

存储、装卸和运输

可持续的 SPL 管理应包括：

- 风险评估，以识别与贮存、装卸和运输相关的潜在环境、社会、经济、健康和安全风险及为减轻这些风险而建立的体系。
- 所有工人均可获取的关于 SPL 运输和装卸的书面协议
- 定期对工人进行 SPL 贮存、装卸和运输相关程序的培训
- 在处理和运输 SPL 和任何有害衍生物时，请遵守所有适用的当地、国家和国际法律，包括《巴塞尔公约》

7. 处理

7.1 SPL 处理的不同方式

SPL 加工处理方式有很多种，本节重点介绍一些目前最广泛使用、且可用于 SPL 商业处理的方式。下表 5 对主要处理方式的关键特征进行了概述。当前正在开发中的许多其他处理方式，要么商业可用性有限，要么还需进一步研究，如第 1 节中阐述的有关试点试验阶段的内容。

	采用首层刨除、次层刨除或两种方法同时使用	氟化物变化	氰化物变化	处理后是否有矿渣、废物残留？
Gum Springs 废物处理厂	同时使用	不可溶氟化钙	已销毁	是
低苛性碱浸和浸灰	同时使用	不可溶氟化钙	已销毁	是
Befesa 公司	B 同时使用	不可溶氟化钙	已销毁	否
Regain 公司	同时使用	最终使用时仍有用	已销毁	否
Weston Aluminium	同时使用	最终使用时仍有用	已销毁	否

表 5：SPL 处理方式和关键特征概要

7.2 预处理-粉碎和研磨

在对 SPL 进行处理、回收或处置之前，通常先对其进行分类或筛分，然后将其粉碎至更细的规格。这种预处理可在现场进行，也可以在 SPL 处理设施或最终用户现场进行。

无论在何处进行预处理，筛分设备、输送机和机械粉碎机（颚式粉碎机，冲击式粉碎机和锤式粉碎机等）的使用都存在许多风险。其他采矿、矿物压碎和研磨活动也会遇到这些风险，包括：

- 电气危险（包括高压电源）；
- 搬运设备&碰撞或损伤，例如运输设备、散装设备、桥式起重机和操作设备；
- 噪音和振动；
- 其他健康和卫生危险-化学接触、有毒烟雾和粉尘。

为减轻以上风险及 SPL 粉碎和研磨过程中的特有风险，考虑以下因素非常重要：

- 对全体员工和承包商进行关于环境、健康和安全的培训；
- 防尘措施，例如防尘罩、封闭加工区域，粉尘过滤系统的使用；
- 尽可能将车辆、机械与工人分开，例如安全门或指定的人行道；
- 减轻噪音和振动，例如给嘈杂的机器加装外壳、使嘈杂的机器远离敏感区域、使用屏蔽屏障等；
- SPL 中的金属碎片（钢或铝）可能会卡在粉碎设备中或影响高速运转，从而导致安全问题；
- 应减少金属钠的存在以及可能产生新可燃气体的可能性。

案例分析 水泥中 SPL 的预处理和粉碎设施-阿联酋环球铝业公司（EGA），阿拉伯联合酋长国

2016 年，EGA 决定在其 SPL 贮存大楼附近建造一个 SPL 预处理和粉碎平台，大楼位于阿布扎比的 Al Taweelah 现场。该设施旨在提高 EGA 的 SPL 管理效率，由 EGA 运营产生的 SPL 的尺寸通常为 300mm 至 1200mm 不等，但水泥生产商通常要求 SPL 的尺寸控制在 40mm 以下。

2019 年，新型处理和粉碎设施投入使用。它是海湾地区同类设施中最大型的，每年可处理 60,000 吨 SPL。该工厂的设计具有减轻重大健康和安全风险的功能，例如，它配备有集尘器和袋式除尘器过滤装置，根据设计，其可排放颗粒的最大浓度为 5 毫克 /标准立方米，最大设备噪音水平为 85 分贝（A）。

该设施的建造是 EGA 持续致力于废物再利用的一部分，经过预处理的 SPL 将用作阿联酋水泥公司的原料。在投资预处理和粉碎设施之前，EGA 曾与专业的第三方合作来处理 SPL。该现场解决方案有望稳固 EGA 与阿联酋水泥公司的长期合作伙伴关系，缩短运输距离，并减少总加工成本。



图 15：预处理设施位置和特征示意图（EGA）

7.3 Gum Springs 废物处理设施

2020年1月，美国铝业公司宣布同意将Gum Springs 设施出售给威立雅环境技术有限公司（VTS），该交易预计在2020年第一季度完成。Gum Springs位于美国阿肯色州，是世界上最大的SPL专用加工设施之一，年产能超过100,000公吨。该设施于1993年10月开始提升产能，包括一个预处理系统和一个包括两个废物处理炉的热处理系统。将SPL与石灰石和沙子混合，并在500至800摄氏度的温度下在炉中处理90分钟。氰化物在此过程中被热销毁，而可溶氟化物在与石灰石反应时形成氟化钙。

处理后的SPL由于其苛性仍被归类为危险废物，现场填埋在危险废物填埋场中，该填埋场收集和处理处置区域的径流水。每处理1吨SPL，就会产生2.5吨废物。美国铝业公司正在寻找在当地其他行业中利用处理后的SPL的机遇。

7.4 力拓低碱浸出和石灰处理（LCLL）工艺

2008 年，基于上世纪 90 年代初阿维达研发中心开发的“低碱浸出和石灰处理”工艺（LCLL），力拓集团在琼奎尔地区（Jonquièrre，魁北克）创办了一家用于处理 SPL 的新工厂，该工厂每年处理 80,000 公吨现存和新生的 SPL。

SPL 处理厂分成两部分：一是干区，一是湿区。干区主要进行 SPL 集装箱的卸载、装卸和贮存，由具有空气分选功能的风扫式自磨机进行 SPL 研磨以及地面 SPL 存储。湿区首先进行氟化物和氰化物的低碱性浸出。过滤后，可将钙添加剂添加到碳质副产品（CBP）中，以减少其在浸出氟化物中的含量（如必要）。浸出液中所含的氰化物在高压和高温水解下被销毁，之后液体中的可溶性氟化钠在多级蒸发装置中浓缩和结晶。最后，固体氟化钠与石灰反应生成惰性氟化钙和苛性碱。苛性溶液（苛化液）在浸出过程中回收利用，多余的溶液返回蒸发器以产生浓缩的苛性溶液。因此，LCLL 工艺共产生三种副产品：

- 碳质副产品
- 氟化物副产品（以 NaF 或 CaF₂ 形式存在）
- 浓缩苛化液（可用于其他工业生产，如氧化铝精炼）

自 2008 年以来，琼奎尔的 SPL 处理厂已处理了 700,000 公吨 SPL。所有生成的 CBP 均已实现增值利用，它作为低密度的（1250 kg/m³）土木工程建筑材料用于建造力拓集团铝土矿渣处置场的坝体。在 CBP 中添加沙子和石灰可提高该副产品的岩土性能。两种刨除物均可用此工艺单独加工或混合处理。实际研发工作将继续最大程度地增加 LCLL 副产品的回收利用途径。该工厂已成功处理了几千公吨的刨除物，与未处理的 SPL 相比，处理后的 SPL 中分离的碳精矿和砖精矿的氟化物含量非常低。水泥行业正在进行一些项目和试点试验，以评估这些副产品能否增值利用。

该工艺中潜在的氟化钙回收利用也是当前研发工作的重点。 在琼奎尔设施中，最有希望的做法是在附近的氟化铝工厂中使用干燥的 CaF_2 作为替代原料（萤石），从而节省大量资金，还可选择其他增值方式，例如钢铁和水泥行业中使用的助熔剂，但需对其进行烧结或干燥。当前，正进行工厂的输出端干燥机系统安装项目，以使 CaF_2 的湿度降低至 10%，这将产生更多增值方式。该设备将于 2021 年底前安装。

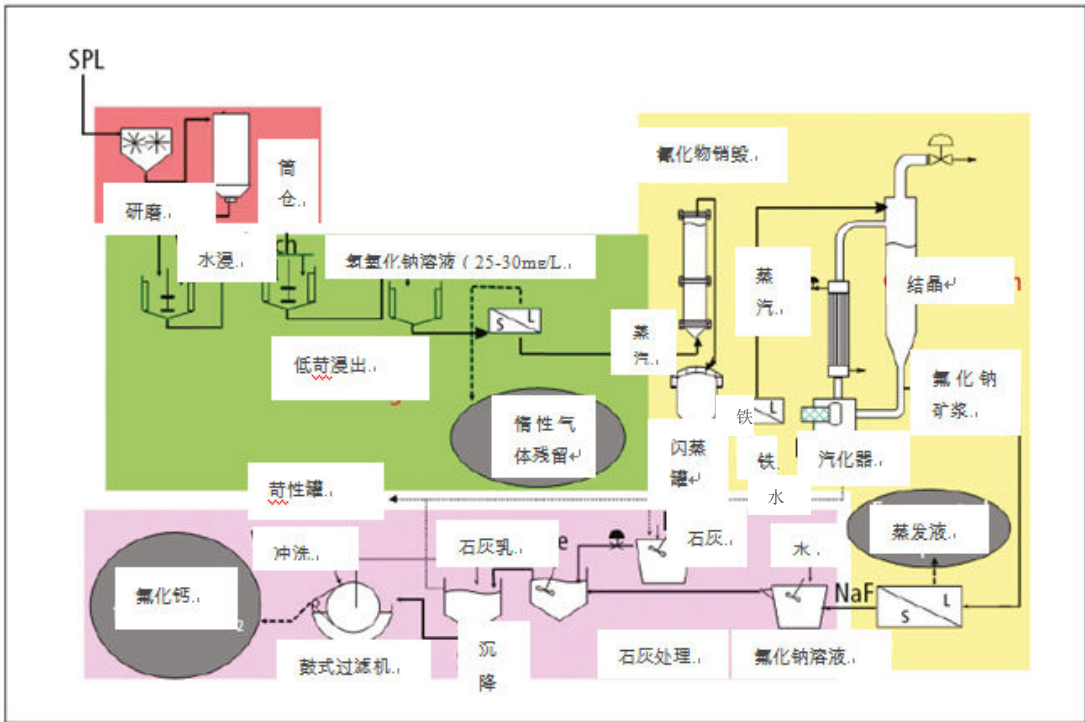


图 16：LCLL 流程图（力拓集团，2017）

7.5 百菲萨 (Befesa)

百菲萨公司总部位于西班牙，在整个欧洲从事钢粉、盐渣和铝渣回收。它是盐渣和 SPL 的主要回收服务公司，处理量可达 63 万吨，共设有 5 座工厂，分别位于德国（3 座）、英国（1 座）和西班牙（1 座）。

通过处理再生铝行业产生的大量废盐渣，百菲萨将其工艺扩大到处理 SPL，SPL 同盐渣一起成为混合原料。SPL 和盐渣共处理，这需要将其粉碎，然后使用化学物质销毁所有氢化物、氮化物和碳化物。加入粉碎的 SPL 可减少处理过程所需的能源。化学反应过后，加入可溶物 NaCl/NaF 以便进行浮渣处理，将固体过滤，收集可用于水泥、陶瓷、制砖和矿物棉等其他行业。最终产品已不存在危害，处理过程中也没有产生其他废物。

百菲萨为全球冶炼厂提供 SPL 回收服务，最近有从欧洲、澳大利亚和新西兰运来的 SPL。据估计，2017 年原铝和再生铝工业中有 50 万吨危险废物是通过百菲萨流程进行处理的。百菲萨有权依据巴塞尔公约的规定颁发竣工证书。

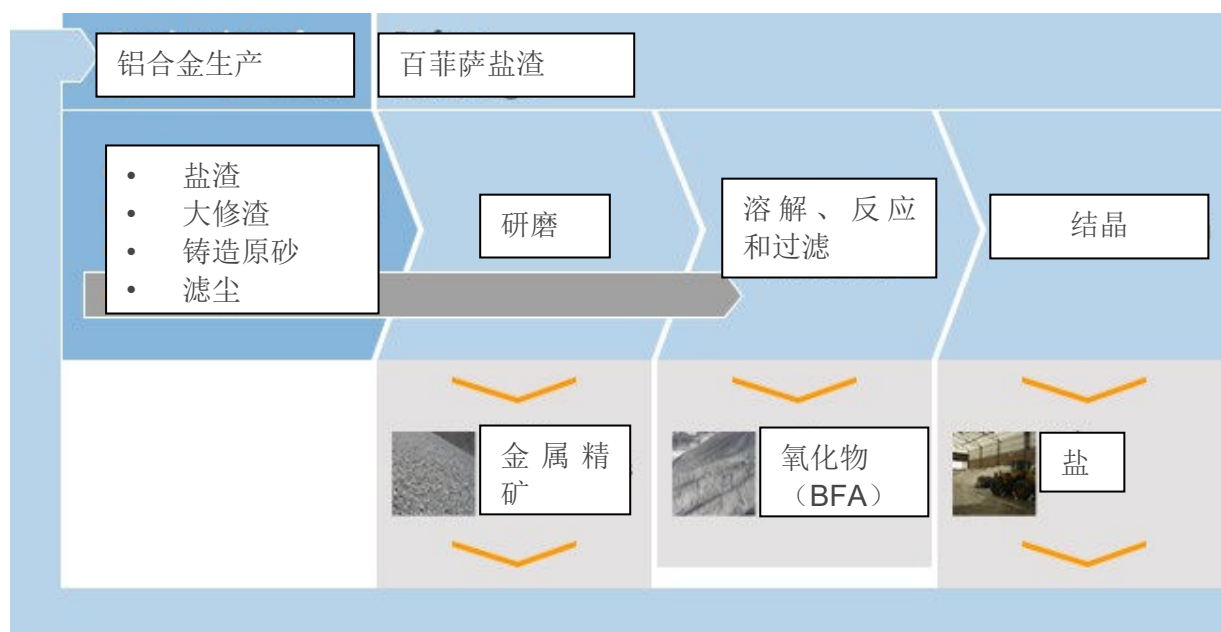


图 17：百菲萨盐渣和 SPL 回收流程

7.6 Regain (公司名)

Regain SPL 解决方案提供对 SPL 进行排毒和精炼的工艺技术，以简化其在水泥生产等其他工艺中的使用。Regain 依赖于工业生态系统方法，其中包括原铝冶炼厂、冶炼厂现场的 SPL 处理厂、市场营销和物流专家以及诸如水泥生产商这样的最终用户。Regain 通常在冶炼厂建造 SPL 处理厂。首先对 SPL 进行分类、物理混合、淬火，以排出有毒气体，然后进行热处理以销毁氰化物。Regain 工艺不会销毁 SPL 中的氟化物，这在某些终端市场中可能是有益的。

Regain 工厂通常处理混合 SPL，但也有能力分别处理首层刨除和次层刨除 SPL。经处理的产品通常不再归类为有害物。在此过程中也不会产生任何残留材料。现已使用 Regain 解决方法处理了超过 37 万吨的 SPL，而且在过去的二十年中每家工厂的成本和技术效率都有所提高。

Regain 的 SPL 处理厂可以在世界任何地方建造。2019 年 12 月，Alba 宣布 Regain 成为技术合作伙伴，在巴林新建一家 SPL 处理厂。该工厂预计将于 2021 年投入运营，产能约为 3.5 万吨。

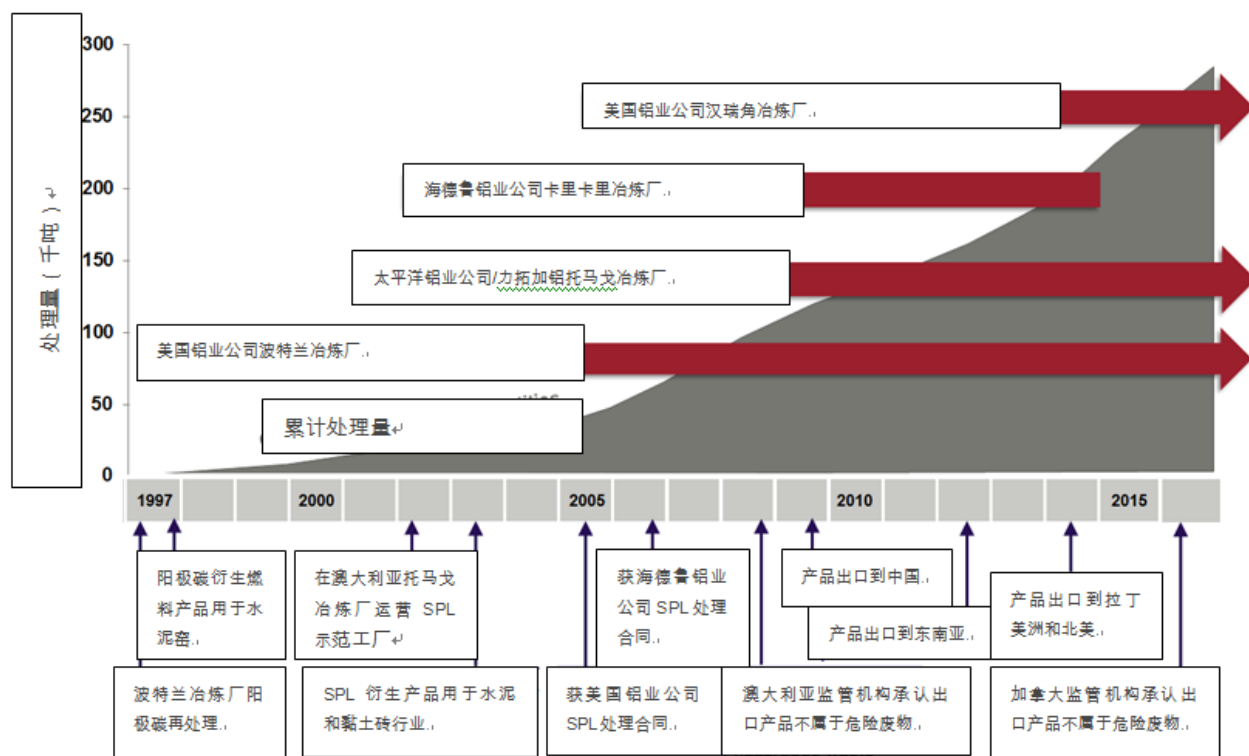


图 18: 1997-2016 年 Regain 的发展历程和关键里程碑 (Regain, 2019)

7.7 Weston 铝业

Weston 铝业（澳大利亚卡里卡里）起初是一家废渣回收公司。其使用旋转炉通过最初在日本开发的无盐工艺进行铝回收。因产能过剩，Weston 铝业几年前开始涉猎 SPL 处理。它首先尝试处理 SPL 次层刨除物，并取得了成功。目前，Weston 铝业同时处理海德鲁铝业（Hydro Aluminium）卡里卡里冶炼厂和波特兰铝业（Portland Aluminium）的首层刨除和次层刨除物。Weston 铝业获准每年处理多达 4 万吨的废渣和 SPL。

分批处理 SPL——将其研磨并与碎玻璃和氧化铁等添加剂混合。将该物料送入旋转炉加热至中等温度（ $<900^{\circ}\text{C}$ ），以销毁氰化物，但避免释放钠和氟化物。依次使用石灰洗涤器和滤袋对废气进行清洁。一批物料处理完成后，在回转式冷却器中将其冷却。如有需要，将产品压碎并与其他添加剂混合。该流程通常根据最终用户需求设计。Neverflux 这一材料主要运往亚洲制砖厂。

处理

可持续 SPL 管理应包括：

- 根据特定工厂问题，考虑商业解决方案及其适用性，如 SPL 特性、工厂位置、监管制度、当地行业机会。

托马戈铝业公司位于澳大利亚新南威尔士州的亨特地区。该公司于 2000 年寻求解决 SPL 库存和永久存储事宜。由于仓库棚的容量有限（3.4 万吨），并且环保法规日趋严格，因此，托马戈于 2001 年开始与 Regain 合作，另寻他途。托马戈选用了 Regain 的技术和工业生态方法，即去除 SPL 中的有毒物，将其制成用于其他工业流程的产品，并且现场运营了一个 SPL 示范工厂。这项技术的主要优点之一是，它不再产生任何废渣，并且可以对两层刨除物进行处理。

Regain 公司发现，对于经过处理的托马戈 SPL，水泥行业是理想承购伙伴。通过此次合作，托马戈意识到了 Regain 解决方法对其 SPL 管理的好处，也因此减少了金融负债，同时在废物管理方法中采用了循环经济原则。现场工厂还免去了将 SPL 运送到欧洲加工商的麻烦，根据废物管理层次提供了理想的结果。



图 19：托马戈铝冶炼厂（托马戈铝业，2019）

自 2001 年启动示范工厂以来，托马戈已通过 Regain 工艺处理了 13.5 万吨 SPL 和其他类似废物。与 Regain 的合作同时在环境和财务方面改进了 SPL 管理。随着 Regain 技术越来越成熟，并被业内其他公司所采用，多年来的不断改进也影响了工艺效率和成本，增加了实践经验及技术专长并从规模经济中受益。

8. 处置和填埋

填埋场是经挖掘或设计建造的场地，用以放置非液体危险废物并将其覆盖作为最终处置。根据废物管理层级，将 SPL 放在填埋场处理通常被认为是最不可取的管理实践。但是，对于某些场址和情况，再利用或回收并不可行，而填埋是废物管理计划的必要组成部分。在这种情况下，以负责任的方式进行处置和填埋很重要。恰当的作法是在最终处置之前对 SPL 进行处理，以减少或消除潜在的有害化合物。在某些情况下，SPL 处理也可以在危险废物现场进行。例如在挪威，废物管理公司 NOAH 将石膏和石灰与 SPL 混合，以使其稳定并固定一些氟化物，然后再将其用作旧矿山修复的回填材料。



图 20：NOAH 危险废物处置场，位于挪威西福尔 Langøya（图片来源，NOAH 网站）

每个国家都有用于市政废物和危险废物的填埋场，在每个辖区，法规都可能要求填埋场的设计和管理具有特定的特征。处置 SPL 时，与相关利益干系者（包括场址所有者、监管机构和当地社区）进行协商非常重要。任何情况下，都应按照各项法规要求进行 SPL 处置，并应获得一切必要的许可。

应进行全面的风险评估，建立关键风险缓解和监控体系，并定期审查其适用性。在规划阶段，应特别考虑填埋场的设计和运营，包括评估特定 SPL 的化学和物理特性、拟建场址的适用性、有害废电解槽的设计、废槽衬材料的适用性以及环境污染物监测系统。通常，恰当的作法是使用阻隔-衬里工程系统将 SPL 在电解槽内处理。与废料（渗滤液）接触的径流水应予以收

集和处理，以尽量减少来自填埋场的污染。应该注意的是，垃圾填埋场和处置系统的适用性在不同的管辖区之间会有很大的不同，应根据具体场址进行评估。

在某些情况下，在最终处置之前会使用海水处理 SPL。这需要用 SPL 填充海岸盆地，涨潮时 SPL 暴露于海水中。海水的作用是在填埋 SPL 之前对其进行中和。在盆地中添加石灰石层可以促进中和过程。曾经在挪威和冰岛实施过海水盆地中和，但现在仅在冰岛采用这种做法，并且需符合运营许可要求。

处置和填埋

可持续 SPL 管理应包括：

- 进行风险评估，以确定与处置或填埋相关的所有潜在环境、社会、经济、健康和安全风险，以及建立适当的监控和减轻这些风险的体系；
- 与相关利益干系者进行磋商，包括场址所有者、监管机构和当地社区，以最大程度地减少对环境和人类健康的影响；
- 遵守所有相关法律和许可。

案例研究 危险废物填埋场考虑事宜——美国环境保护署（USEPA）

在美国，填埋场选址、设计、运营和监测均应符合联邦法规。填埋场旨在保护环境免受废物流中可能存在的污染物的影响。填埋场不能建在环境敏感区域，需建立现场环境监测系统。这些监测系统检查地下水是否污染以及填埋场是否有沼气，并提供其他保护措施。现在的填埋场必须满足《资源保护和恢复法》（RCRA）所严格规定的设计、运营和关闭要求。

RCRA 法案分篇 C 对危险废物进行了规定。此分篇建立了一项联邦大纲，涵盖了危险废物从产生到处理完成整个过程的管理。分篇 C 大纲的目标是确保以保护人类健康和环境的方式处理危险废物。为此，分篇 C 对于危险废物（包括 SPL）的产生、运输和处理、存储或处置均做出了规定。

选择并设计填埋场是为了尽可能地减少危险废物释放到环境中。美国危险废物填埋场的设计标准要求如下：

- 双重内衬
- 双重渗滤液收集和清除系统
- 泄漏检测系统
- 流进流出以及风扩散控制
- 施工质量保证项目

操作员还必须遵守检查、监测和排放响应要求。由于垃圾填埋场是永久性的处置场所，并且关闭后废物仍然存在于此，因此要遵守关闭和关闭后的管理要求，包括：

- 安装和维护最终盖板
- 渗滤液收集和清除系统持续运行，直至不再检测到渗滤液为止
- 维护和监控泄漏检测系统
- 维护地下水监测
- 防止雨水流进流出
- 安装和保护测量基准

下图显示了根据 USEPA RCRA 法规设计的有害物质填埋场。这仅是一个辖区要求的示例，不同辖区的监管要求会有所不同。

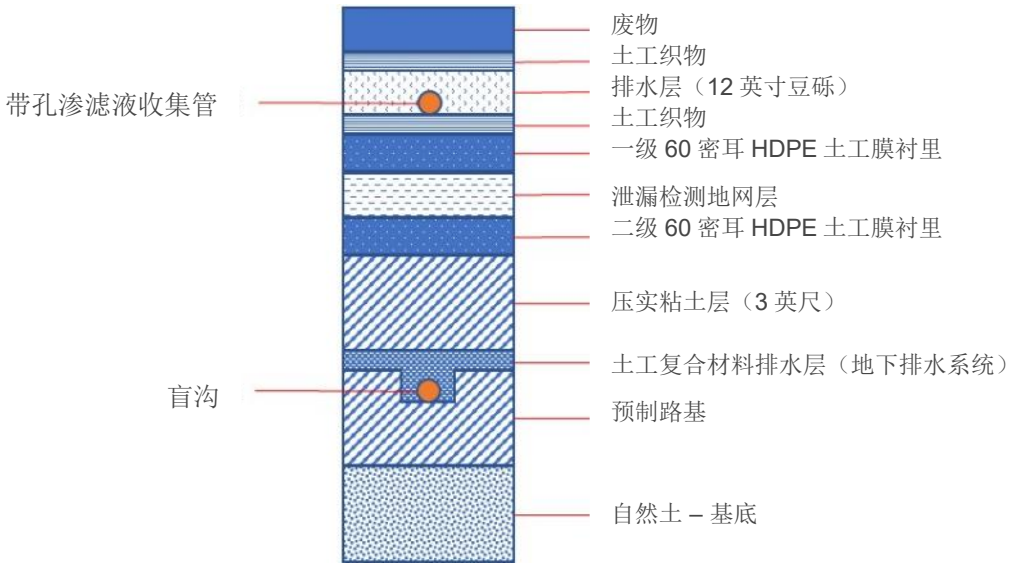


图 21：根据 RCRA 规定设计的危险废物阻隔衬里系统（仅用于说明）

需覆盖废物以避免或尽量减少水与废物的接触。下图显示了覆盖的具体方式：

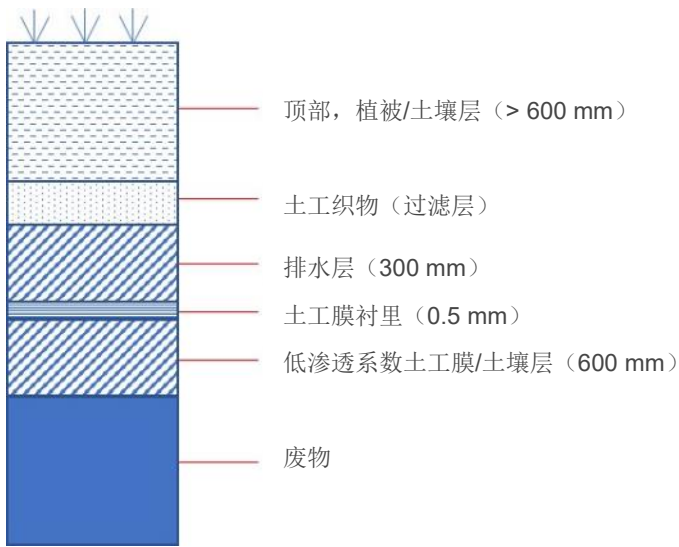


图 22：根据 RCRA 法规设计的危险废物覆盖阻隔-衬里系统（仅用于说明）

9. SPL 的应用

9.1 在其他行业中使用 SPL

SPL 可用作其他工业流程中的材料。为促进循环经济和提高资源效率，许多公司正在积极寻求 SPL 在其他行业中的利用机会。当前有许多不同的行业在其生产过程中使用 SPL 作为能源或原料。本章概述了最广泛使用的用途。下表 6 汇总了各用途的主要特点。

工业用途	首层刨除/次层刨除/首层+次层刨除	预处理	用途/影响	氟化物	氰化物
水泥	首层+次层刨除	粉碎	能源&原料	助熔作用	被销毁
钢铁	首层刨除	粉碎	能源	助熔作用	被销毁
矿物棉	首层刨除	粉碎和筛选	能源	被矿物棉和气体净化过程捕捉	被销毁

表 6：SPL 用途和主要特点摘要

9.2 水泥

SPL 可用于水泥生产过程，且其成分对水泥生产有益。可以将其作为替代燃料或原料添加到熟料生产过程中（熟料是水泥的前体），带来经济和环境效益。传统上，煤在水泥窑和煅烧炉中用作燃料，但 SPL 中包含的碳可用作该过程的燃料。此外，氟化物还充当助熔剂，可增强矿化作用并降低所需的窑温。窑内温度很高（约 1450° C），会销毁 SPL 中的有害氰化物，从而没必要预处理脱毒。SPL 首层和次层刨除物均可用于水泥生产。

	SPL成分	对水泥生产的作用/影响
首层刨除 碳层	碳	降低燃料需求 – 燃烧释放热量
	硅	替代熟料中的标准原料
	铝	
次层刨除 耐火层	Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO	
	碱	平衡其他原料中的SO ₃ 废气
	氟化物	助熔作用 – 纳入熟料
	硫	硫含量相对较低
	氰化物	NO _x 的潜在洗涤塔

表7：SPL成分及其在水泥生产过程中的作用（改编自EGA，2019）

在熟料生产过程中添加SPL还存在挑战——特别是考虑到SPL的碱性质及其所含的大量钠（Na）。在混凝土生产中，钠含量受到限制，因为它会对产品质量产生不利影响。这限制了SPL在使用高碱度原料的水泥厂中的利用。据估计，低碱度水泥厂可以添加至生料重量的0.75%。一般水泥厂添加重量百分比在0.25-0.5%的范围内。

早在1986年就在美国进行了在水泥中使用SPL的早期试验。目前，在水泥生产中利用SPL一直是全球铝冶炼厂最广泛探索的大规模利用SPL的选择之一。合适的当地水泥制造商以及区域运输和物流决定了水泥行业作为SPL消费者的生存能力。SPL和水泥的大规模共处理已在许多国家进行，包括：巴西、南非、美国、澳大利亚、阿曼、阿联酋、卡塔尔和印度。水泥生产仍然是最大的SPL消耗过程之一。

案例研究：阿联酋环球铝业公司（EGA），阿联酋

自2010年以来，EGA已与总部位于阿联酋的多家水泥公司合作，共同探索在水泥生产过程中使用SPL的可能性。EGA已成功向多家阿联酋水泥公司提供了SPL用于生产，并于2018年向阿联酋水泥生产商提供了超过41000吨的SPL储备。作为EGA与当地水泥生产商发展关系并提高SPL利用率战略的一部分，EGA于2019年着手进行全面研究，以量化在水泥生产过程中添加SPL的环境效益。

该研究旨在支持铝冶炼厂与水泥制造商之间的对话，调查了将SPL用作当地水泥厂生产过程中的原料的环境效益。巴林星际水泥公司（Star Cement）位于哈伊马角（Ras Al Khaimah），距离EGA运营场所不远。该研究聚焦于环境问题的三个关键领域：

- NO_x和SO_x排放；
- 节能和减少二氧化碳；
- 原材料再利用和有毒物质销毁。

应当指出，尽管本研究中EGA提供的SPL的成分不是第9页所述的“典型”成分，但分析类型、与水泥生产商的关系建立以及旨在证明在水泥中使用SPL的潜在好处的目标是广泛适用的。

巴林星际水泥公司的产品目前遵循BS EN水泥标准，根据市场需求将生料中的SPL重量百分比限制为0.75%。该研究聚焦于在原料中使用0.6%SPL，并得出结论：由于添加了这种物质，燃料消耗和排放量显著降低：

- 煤炭消耗估计减少了3.5%；
- CO₂排放量和NO_x排放量分别减少了0.74%和3.75%；
- 诸如氰化物和氟化物之类的有毒物质减少到检测限值以下。

这项研究的结果支持EGA提高水泥生产中SPL利用率的策略，并得出结论：应对水泥生产中使用其他铝冶炼废料进行进一步研究。该研究有两个值得注意的建议：

1. 需要进一步的跨行业合作，以推广使用SPL，改善水泥厂的环境影响；
2. 需要进一步研究添加SPL对微结构水泥产品的影响。

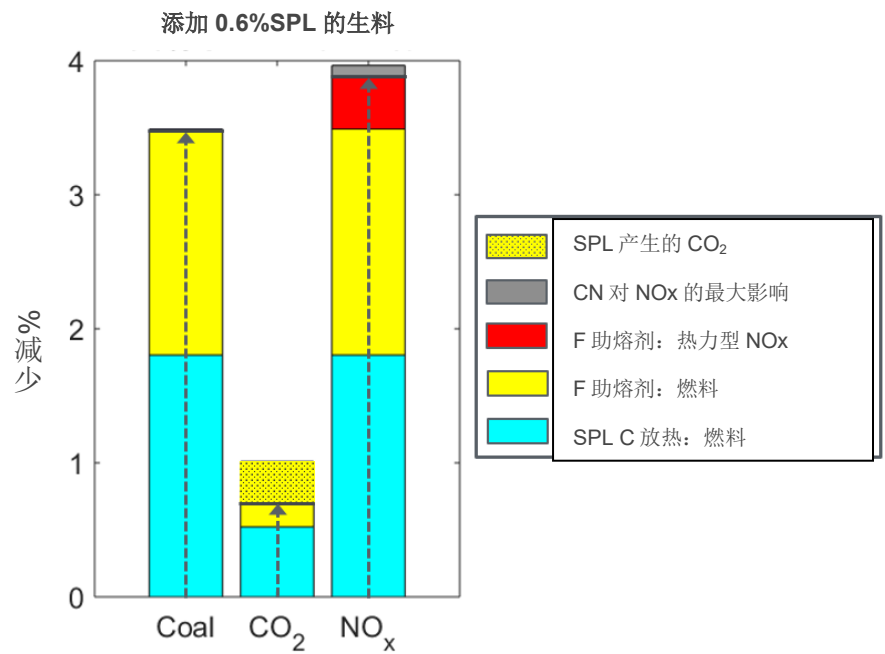


图 23：0.6%SPL 对水泥生产中煤炭消耗以及 CO₂ 和 NO_x 排放的影响（EGA，2019）

9.3 炼钢

通过碱性氧气炉（BOF）和电弧炉（EAF）进行的钢铁生产使用多种富含碳的材料。通常，在该过程中使用冶金焦炭或粉状碳喷射，但是在这些原材料短缺的情况下，钢铁制造商对掺入替代碳质材料持开放态度。首层刨除SPL具有高碳含量，可以用作次级燃料源或炉中的还原剂。SPL的硫含量也低，这对钢铁制造商有利，因为过量的硫会影响钢的脆性和可焊性。



图 24：钢铁生产过程中碱性氧气炉中的铁水（国际钢铁协会，2019）

添加SPL还可以带来其他好处：改进隔热性能，从而可以更好地形成炉渣并提高炉渣的流动性。由于氟化物的助熔特性，SPL还可以降低熔炉中的熔点。人们还发现，氟化物可增加脱硫过程中石灰的脱硫效率。

当地合适的钢铁制造商决定了钢铁行业作为SPL消费者的生存能力。巴西、俄罗斯、阿曼和卡塔尔等国已在钢铁生产过程中利用SPL。

案例研究：苏哈尔铝业和金达尔钢铁公司，电弧炉，阿曼

作为苏哈尔铝业公司可持续废物管理策略的一部分，它与相邻的金达尔钢铁公司合作，探索在电弧炉中将SPL用作碳质原料的机会。在此之前，卡塔尔钢铁公司的电弧炉工艺成功利用了超过5000吨的废碳质材料。电弧炉使用大电流电弧生产钢，该电弧可熔化废料或还原铁矿石或生铁颗粒。粗碳通常用于该工艺中，但也有可能被首层刨除的SPL所替代（至少一部分）。金达尔使用直接还原铁，需要碳来校正钢的最终碳含量。金达尔钢铁公司是阿曼最大的综合钢铁厂，与苏哈尔铝业公司的合作始于2016年，合作尚处于试验阶段，以测试在炼钢过程中添加苏哈尔公司首层刨除SPL的可能性。

在成功的试验期之后，2017年，金达尔钢铁公司开始从苏哈尔铝业公司提取首层刨除SPL。在将SPL送入电弧炉之前，先将其粉碎成更细的尺寸（50至80毫米）。SPL经过这种预处理后，便于炼钢厂使用，但也会导致残留细小颗粒。苏哈尔铝业公司和金达尔钢铁公司的合作减少了对原始原材料的需求，并为双方带来了成本和环境效益。

案例研究：俄罗斯铝业联合公司（UC RUSAL），俄罗斯和西西伯利亚冶金厂，俄罗斯联邦

UC RUSAL的整体废物管理策略旨在：

- 增加废物的回收量和再利用量；
- 确保废物的安全储存和处置。

自2011年以来，UC RUSAL与当地研究机构开展研究和活动，以扩大其铝生产过程中产生的废物的利用市场。2014年，UC RUSAL冶炼厂的SPL出售给了位于克麦罗沃地区的西西伯利亚（West Siberian）冶金厂，供其用于碱性氧气炉中。SPL用作氟石的部分替代品，可将炉渣液化并促进除渣过程。

目前，俄罗斯铝业公司（RUSAL）的Bratsk铝冶炼厂向西西伯利亚冶金厂提供的大修渣（SPL）约占其年生产总量的10~20%。在过去的几年里，这种持续的关系促使RUSAL冶炼厂回收利用的SPL的总体份额持续增加（图25）。

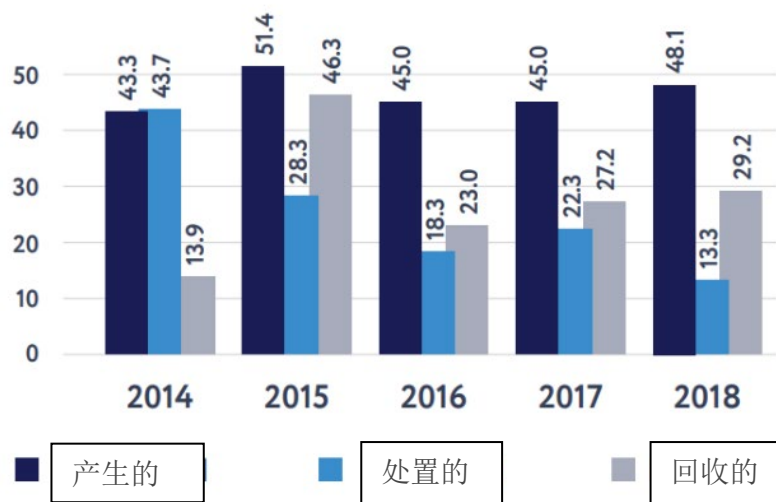


图 25：UC RUSAL 2014 至 2018 年间产生、处置和回收利用的 SPL（' 000 吨）

（UC RUSAL, 2018）

9.4 矿物棉

矿物棉是由熔融岩石和矿物质制成的保温材料。全球有许多不同的矿物棉制造商。ROCKWOOL 是一家主要的矿物棉制造商，自 1999 年以来一直在其工艺中应用 SPL。该制造商负责处理挪威、加拿大、新西兰和德国的冶炼厂产生的 SPL。矿物棉的生产工艺使用首层刨除的 SPL 替代了原本用于熔炉且更昂贵的焦炭。该熔炉是一种冲天炉，在熔炼工艺中可在一定程度上使用首层刨除的 SPL 替代碳材料作为燃料。冲天炉工艺应用通过炉内的原料床生起的一股热气。基于热值的不同，2~3 吨首层刨除的 SPL 在此工艺中可替代 1.3~2 吨的焦炭。

由于炉床内部必须维持便于空气流通的孔隙率，因此对于 SPL 给料的尺寸通常有特定的要求。焦炭的既定公称尺寸为 100~250mm。不可使用更精细的尺寸（<50mm），并且要将此类尺寸分开进行预加工并发送给第三方用户。由于耐火材料和工艺不兼容，因此首层刨除的 SPL 必须尽可能干净。

在矿物棉的处理过程中，氰化物被完全销毁，而钠和氟化物主要包含在岩棉熔体中。为了处理危险废料，ROCKWOOL 拿到了具有严格排放限值要求的特别许可证。由于某些氟化物以气体形式释放，因此需要在工艺过程中实施烟气净化。

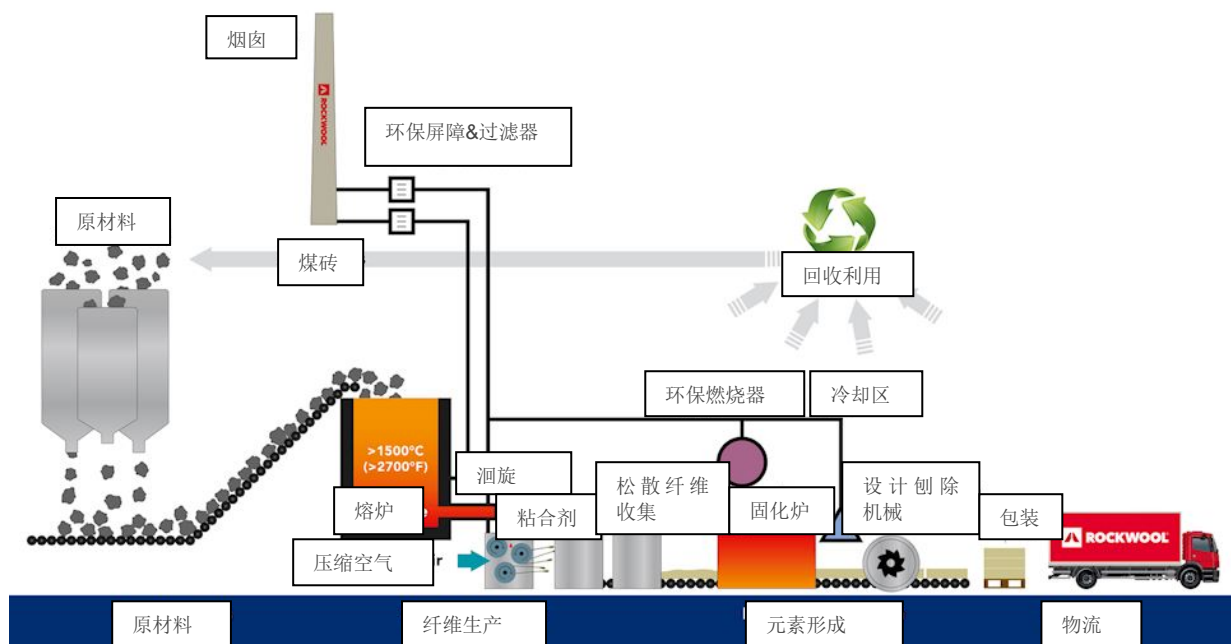


图 26：矿物棉工艺示意图（图片来源：ROCKWOOL）

案例研究：矿物棉中的 SPL - 俄罗斯铝业联合公司（UC RUSAL），俄罗斯

作为在其他行业重复使用 SPL 综合计划的一部分，UC Rusal 开发了 SPL 在矿物棉生产中的应用。在此工艺中，首层刨除的 SPL 可作为燃烧添加剂部分替代熔化原料（辉长岩-玄武岩类岩石，白云石，酚醛树脂，改性剂）所用的铸造焦炭。铸造焦炭和天然气在冲天炉燃烧过程中通常用作主要的能源成分。

UC Rusal 在行业测试阶段与矿物棉制造商紧密合作，以确立最佳工艺参数。设置这些参数是为了在添加铸造焦炭、残阳极和首层刨除的 SPL 的同时维持稳定的燃烧工艺。测试阶段的结果表明，当残阳极和首层刨除的 SPL 按 1.2/1 的比例添加进冲天炉时，铸造焦炭的消耗降低到 30%。为了优化首层刨除的 SPL 在矿物棉生产中的应用，UC Rusal 和矿物棉制造商保持着紧密合作。

SPL 的利用

SPL 的可持续管理应包括：

- 基于厂址的特定问题，比如 **SPL** 特征、厂址位置、管理制度和当地行业机会，考虑 **SPL** 的不同利用方法及其适用性，。
- 尽可能最大化 **SPL** 在其他行业应用中的利用机会。

10. 研究计划&其他进展

前几章中概述的 SPL 处理和利用方法发展成为可实施的商业化 SPL 解决方案历经了许多年。目前，尚无明确的方法可去除原铝生产工艺中产生的 SPL，因此目前研究的焦点仍是创新和开发新型的 SPL 处理方法。为了符合当前可持续废物管理实践相关的循环性和资源效率的目标，许多计划旨在寻找将 SPL 从废物转变为有价值的原材料的方法。

在本节中，我们总结了 SPL 处理技术的一些最新进展。这些处理技术虽然尚未商业化，但体现了正在开发中的其他潜在解决方案。请注意，这其中许多工艺尚未在行业范围内得到验证，因此无法保证任何工艺将发展成为商业化解解决方案。我们还将中国 SPL 管理信息纳入到本节中。

10.1 中国

中国对 SPL 中危险废物的分类限制了冶炼厂的处置方法，但到目前为止，尚未确定用于 SPL 大规模管理的明确解决方案。中国有色金属工业协会提供的轶事信息表明，由于氟化物销毁将免除危险废物的分类，因此大多数研究都集中于此项工作。到目前为止，大部分研究仍在实验室研发阶段。危险废料存储的新法规还规定仓库/存储建筑物的存储期限为 12 个月。

中国铝业集团有限公司（Chalco）自 2005 年运营以来一直对其 SPL 进行脱毒处理。Chalco 拥有 2 个正在运营的 SPL 处理厂，工艺过程包括将 SPL 压碎、与石灰石和添加剂混合以及将其送入温度为 900~1050℃ 的窑中。最终产物为可在还原槽中回收利用的氟化铝和可用于水泥生产的固体残渣。

10.2 真空处理

SPL 真空处理的研究仅与首层刨除的碳内衬有关。该工艺使用高温和真空去除碳材料中的氟化物和钠等物质。此工艺可保留再利用物质，同时对氟化物进行冷凝并回收。许多研究人员正致力于真空处理方法的研究，包括多伦多大学和挪威科技大学从事的研究。美国铝业公司与海德鲁铝业公司通力合作，在瑞典的 Swerim 金属研究机构研发了测试真空处理理念的小型试验机项目。该工艺可能会生产出在其他应用中再利用的高纯度碳。

10.3 Oriens 工艺

Oriens 工艺由最初的 Calsifrit 工艺发展而来，该工艺回收利用 SPL，以生产出能够增强水泥强度并改善孔隙率的添加剂。Oriens 工艺已进行了若干改进，例如设备用回转炉替代了窑，这对控制产品质量具有独特的优势。该工艺不会产生任何残渣，并且产品是名为 Adcim 的替代性火山灰水泥添加剂。Oriens 在加拿大的贝冈古 (Bécancour) 经营了一家半商业化的工厂，并且曾经负责处理魁北克冶炼厂生产的 SPL。尽管该工厂仍处于关闭状态，但 Oriens 的技术可用于将来的 SPL 处理。

10.4 等离子体玻璃化

Tetronics 公司和 Harsco 公司应用 Tetronics 研发的等离子体技术成立了一家 SPL 处理厂。该技术涉及在熔炉中对 SPL 和添加剂进行温度接近 10,000° C 的等离子体炬的处理。所得材料是惰性玻璃。虽然建成了一家工厂，但处理成本相对较高，且其部署仍处于试验规模水平。

10.5 意大利 Engitec (公司名)

Engitec 公司是废盐渣回收 (STE) 工艺的最初开发者之一。该公司以研发一种处理 SPL、回收氟化物和钠等产品的工艺起家，这些回收产品可能会在浴室中再利用。碳和耐火材料先经过脱毒处理，然后从此工艺中废弃。

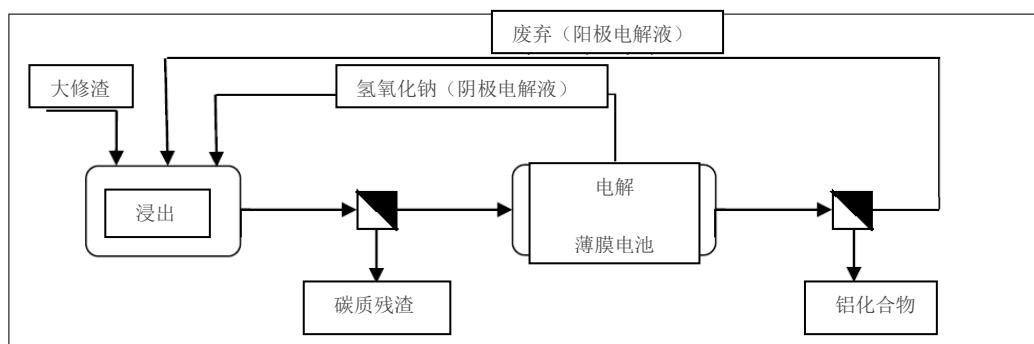


图 27: Engitec 公司正在开发的处理 SPL 的新工艺流程图

Engitec 工艺的新颖之处在于使用了使 SPL 浸出的苛性钠再生的特殊薄膜（图 28）。Engitec 公司正与米兰大学开展研发合作，该公司建立了一个 15 千克/小时的试验机项目，并正在寻求工艺测试。值得注意的是，此 SPL 工艺能与 STE 工艺进行集成。

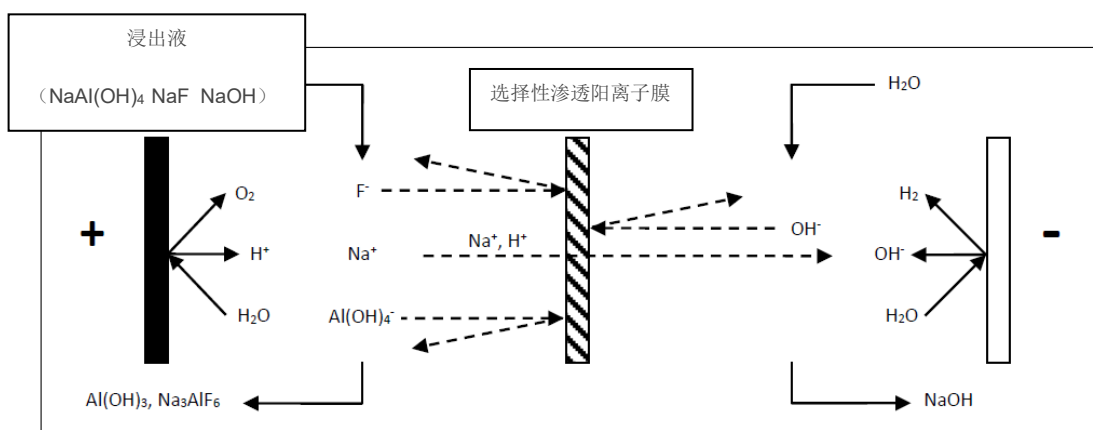


图 28: 薄膜在 Engitec SPL 工艺中的工作原理

11. 参考文件

阿迪亚波拉集团 (Aditya Birla Group)，可持续发展商业报告，2017，访问链接：
<http://sustainability.adityabirla.com/group-sustainable-business-report/Group-Sustainable-Business-report.pdf>

今日国际铝业，处理 SPL 的可持续效益，可持续发展增刊，2018，访问链接：
https://issuu.com/quartzbusinessmedia/docs/aluminium_international_today_susta

百菲萨公司 (Befesa)，盐渣和 SPL 回收利用服务，2019，访问链接：
<https://www.befesaaluminium.com/web/en/nuestros-procesos/detalle/Salt-slags-and-SPL-Recycling-Services/>

Broek, S和Øye, H，SPL管理的基本原理，第36届国际ICSIBA会议纪要，2018

阿联酋环球铝业公司 (EGA)，可持续发展报告，2017，访问链接：
<https://www.ega.ae/media/1538/ega-2017-sustainability-report.pdf>

EGA和MIT，水泥中SPL的环境效益，2018

EGA 和 SNC-Lavalin，SPL 长期存放建筑物的危害和风险研究，2016

欧盟委员会，废物管理计划，2019，访问链接：
<https://ec.europa.eu/environment/waste/plans/index.htm>

欣达尔科铝业公司 (Hindalco)，可持续发展报告，2018，访问链接：
<http://www.hindalco.com/upload/pdf/sustainability-report-2018-19.pdf>

海德鲁铝业公司 (Hydro Aluminium)，SPL 导则输入，2019

ICMM，健康和安全风险评估，2012，访问链接：
https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/health-and-safety/161212_health-and-safety_health-risk-assessment_2nd-edition.pdf

ICMM，应急准备与响应，2005，访问链接：
<https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/health-and-safety/good-practice-emergency-preparedness-and-response>

Regain Materials，铝产品工艺，2018，访问链接：
<http://www.regainmaterials.com/aluminium-smelting-industry/aluminium-production-process>

Regain Materials, 大修渣挑战, 2018, 访问链接:

<http://www.regainmaterials.com/aluminium-smelting-industry/spent-potlining-challenges>

力拓集团 (Rio Tinto), BC 工厂环境报告, 2018, 访问链接:

<https://www.riotinto.com/en/Operations/canada/bc-works>

索哈尔铝业公司 (Sohar Aluminium), 可持续发展报告, 2017, 访问链接:

<http://www.sohar-aluminium.com/sites/default/files/Sustainability/Sustainability-Report-2017-Final.pdf>

托马戈铝业公司 (Tomago Aluminium), 我们的历史, 2019, 访问链接:

<http://www.tomago.com.au/assets/Our-History.JPG>

俄罗斯铝业联合公司 (UC Rusal), 可持续发展报告, 2018, 访问链接:

<https://www.unglobalcompact.org/participation/report/cop/create-and-submit/advanced/434896>

Wesdock J. 和 Arnold, I, 铝行业的职业和环境健康: 健康从业人员要点, 职业与环境医学期刊, 56, S5-S11

国际钢铁协会 (worldsteel), 图像库, 2019, 访问链接:

<https://images.worldsteel.org/>

12. 参考文献

Black, P, 大修渣的遗留问题 - 成本还是机会, 2016, 访问链接:

<https://www.lightmetallage.com/news/blog/the-legacy-of-spent-potliner-cost-or-opportunity/> [访问日期 2018 年 7 月 28 日]

Black, P. 和 Cooper, B, 可持续发展增刊: 工业生态 SPL 解决方案, 今日国际铝业, 22-24,

访问链接: https://issuu.com/quartzmetals/docs/aluminium_international_today

Birry, L, Leclerc, S 和 Poirier, S, LCL&L 处理: 大修渣处理和回收利用的可持续解决方案: E. Williams (Ed), 轻金属, 2016, 467-471, 访问链接: [10.1002/9781119274780.ch77](https://doi.org/10.1002/9781119274780.ch77)

Broek, S, SPL基本原理, 赫氏公司 (Hatch) 咨询介绍

中央污染控制委员会, 危险废物运输导则, 环境&森林部, 2007

EBRD, 2014 年度子行业环境&社会导则, 有色金属处理, 2014, 访问链接:

<https://www.ebrd.com/downloads/about/sustainability/Mineral.pdf>

Engitec Technologies, Engitec Technologies - 科技, 2019, 访问链接:

<http://www.engitec.com/>

IAI, 铝土矿可持续开采导则, 2018, 访问链接: http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2018/05/18/170518_sbmj_final.pdf

IAI, 铝行业2015年度生命周期清单和环境指标报告, 2017, 访问链接: <http://www.world-aluminium.org/publications/tagged/mass%20flow/>

IAI, 铝土矿渣管理: 最佳实践导则, 2014, 访问链接: http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2015/10/15/bauxite_residue_management_-_best_practice_english_oct15edit.pdf

OECD, 可回收废物越境转移控制指导手册, 2009, 访问链接 <https://www.oecd.org/env/waste/guidance-manual-control-transboundary-movements-recoverable-wastes.pdf>

Øye. H. A, 行业大修渣处理讨论: 德国汉堡国际 ICSOBA 会议纪要, 2017 年 10 月 2-5, 1081-1087

Parhi, S.S, 充分利用大修渣 - 铝行业的危险废物, 2014, 访问链接: <https://core.ac.uk/download/pdf/80147471.pdf>

联合国, 危险废物产生, 2017, 访问链接:

<http://data.un.org/Data.aspx?q=WASTE&d=ENV&f=variableID%3a2830>

美国国家环境保护局 (US EPA), 大修渣最佳论证可用技术背景文件, 2000, 访问链接 <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/web/pdf/k088back.pdf>

13. 附录 A: 安全数据表示例



Rio Tinto MSDS SPL
CA.pdf



Rio Tinto MSDS SPL
EU.pdf

国际铝业协会

杜克街 2 号

圣詹姆斯区

伦敦

SW1Y 6BN

英国

+44 (0) 20 7930 0528

www.world-aluminium.org