

引文格式:冯文静,凌雪蕊,张昊宇,等. 基于事故树分析的铝电解漏铝事故致因机理分析[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(3): 96-105.

FENG Wenjing, LING Xuerui, ZHANG Haoyu, et al. Analysis of the causal mechanism of aluminum leakage accidents in aluminum electrolysis based on fault tree analysis[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(3): 96-105.

基于事故树分析的铝电解漏铝事故致因机理分析

冯文静^{1,2}, 凌雪蕊^{1,2}, 张昊宇^{1,2}, 全鹏程³, 张 昊^{1,2}, 唐巧玲^{1,2},
江茂华⁴, 尹 刚^{1,2}

(1. 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044;
3. 阿坝铝厂, 四川 阿坝藏族羌族自治州 623001; 4. 重庆高峰新材料科技有限公司, 重庆 404160)

[摘 要] 铝电解生产中的漏铝事故是铝电解车间最严重的工艺安全事故之一, 具有突发性强、连锁反应快、处置难度大等特点, 对其进行科学合理表征是保障生产安全的重要步骤。本文运用事故树分析法, 以电解槽漏铝事故作为顶事件, 构建包含 12 个基本事件的定性分析模型。经最小割集与最小径集分析, 识别出导致漏铝事故的 11 条路径, 其中底部漏槽由 X_1 - X_9 事件中单一因素即可触发, 而侧部漏槽需 (X_{10} / X_{11}) 与 X_{12} 共同作用。采用最小割集近似法计算结构重要度, 结果表明, 内衬材料质量差、筑炉质量差等底部相关因素 ($I_{\varphi}=1$) 对事故影响最大, 其次为侧部腐蚀与槽温过高。定量评估结果显示, 顶事件年发生概率约为 4.40%, 和实际统计数据高度吻合, 验证了模型的有效性; 敏感性分析表明, 集中控制 X_1 (内衬材料质量差)、 X_2 (筑炉质量差) 这类高概率、高结构重要度事件, 能够显著降低系统的整体风险。本研究构建的静态 FTA 模型不仅为电解铝企业提供了科学的风险管控依据, 还为高温冶金设备的本质安全设计提供了理论支持, 推动电解铝企业利用智能化技术将安全管理从被动响应向主动预测模式转变。

[关键词] 铝电解; 漏铝事故; 事故树分析(FTA); 风险防控; 结构重要度

[中图分类号] TF821; TF804.4 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6103(2026)03-0096-10

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.03.010

[收稿日期] 2025-12-30 [修订日期] 2026-02-08

[录用日期] 2026-02-13 [出版日期] 2026-06-01

[第一作者] 冯文静(2004—), 女, 本科生, 主要从事工业安全科学与技术研究。

[通信作者] 尹刚(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为工业过程建模、智能优化与深度学习、智慧安全、人工智能、有色金属冶炼检测与监测技术。

[基金项目] 国家重点研发计划项目“职业环境金属中毒致相关疾病干预控制研究”(2025YFC2511700); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金“铝生产过程中安全智能管控及节能高效资源化利用关键技术研究”(CSTB2024NSCQ-LZX0166); 重庆英才·创新创业示范团队项目“铝电解安全风险辨识与感控技术及应用”(cstc2024ycjh-bgzxm0131); 中央高校基本科研业务费 NO. 2024CDJQYJCYJ-001; 自然科学基金重点横向项目“铝电解槽系列对地漏电故障定位检测及预警系统研究”(H20210777); 科技转化重大项目(专利转让)“基于漏槽监控装置的铝电解漏槽检测方法”(H20201555)。

0 引言

铝电解是一种高耗能、高风险的高温冶金过程, 其安全生产直接关联到人员生命、设备完整性与环境安全。随着电解槽大型化与智能化发展, 传统的、基于经验的安全管理模式已难以应对复杂失效模式的挑战^[1]。漏铝事故作为铝电解车间最严重的工艺安全事故之一, 具有突发性强、连锁反应快、处置难度大等特点, 亟需运用系统化方法揭示其深层致因机制^[2]。因此, 科学合理地电解铝生产中的泄漏、爆炸等典型事故予以表征, 是保障生产安全的重要步骤^[3]。

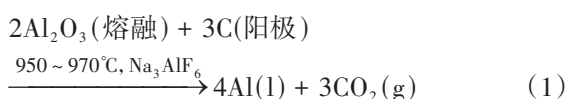
事故树分析(Fault Tree Analysis, FTA)作为一种系统化的风险评估方法, 运用演绎推理来发现事故发生的潜在路径和关键因素, 已在航空、化工等

高危行业得到广泛应用^[4]。在铝电解领域,部分企业已开展事故树应用探索,但现有研究大多只是对单一事故案例进行分析,对漏铝事故致因机理的系统性解构很少,尤其缺少定量分析和针对性防控措施的研究,且大量研究依赖于事故发生后的案例复盘,这种方法本质上是被动的,缺乏前瞻性的风险预测能力。随着智能制造技术的发展,传统基于人工巡检的安全监测模式正面临着数据滞后、误差大等严峻的挑战,亟需建立融合先进监测技术与系统安全理论的新型防控体系。本文采用事故树分析法在安全工程领域的应用形式,构建了电解槽漏铝事故的逻辑模型,通过计算基本事件的发生概率与结构重要度,为漏铝事故提供了定量的风险基线,这使得风险管理从依赖主观经验判断转向基于数据驱动的优先级排序,为企业有限安全资源的精准投放提供了科学依据。

1 铝电解厂漏铝事故概述与理论基础

1.1 铝电解生产工艺与漏铝事故特征

现代铝电解采用霍尔-埃鲁(Hall-Héroult)工艺,常采用冰晶石-氧化铝融盐电解法^[5],反应方程式见式(1)。



在950~970℃下用熔融冰晶石(Na_3AlF_6)作电解质、氧化铝(Al_2O_3)作原料,通过直流电作用在碳素阴极槽内还原生成液态铝。电解槽由钢壳、耐火砖、保温层、阴极炭块及侧部炭块构成,槽内衬长期承受着高温铝液(约960℃)、电解质侵蚀及电磁力扰动,一旦内衬破损或钢壳失效,高温铝液(密度为2 300 kg/m³)将穿透炉底或侧壁引发漏铝事故^[6]。该过程有隐蔽性强、突发性高、连锁反应快的特点,是电解铝安全生产的核心风险点^[7]。

漏铝事故的发生发展具有明显的隐蔽性和累积性,从隐患出现到事故发生通常存在一定潜伏期,传统人工监测方法很难捕捉温度突变等早期预警信号,尤其阴极钢棒温度异常普遍仅在漏炉前2 h出现,给有效干预带来极大挑战^[8]。根据泄漏位置的不同,漏铝事故可分为底部漏槽和侧部漏槽两类,底部漏槽多因炉底隆起变形、底部腐蚀或焙烧

启动不当导致,通常发展较为缓慢但后果严重,可能冲坏阴极母线造成系列停电,侧部漏槽则主要由侧部内衬腐蚀、钢壳烧穿引起,具有突发性强的特点,高温铝液的直接外泄容易引发火灾^[9]。

1.2 事故树分析方法原理

事故树分析是从顶事件(不希望发生的事故)出发,利用逻辑推理逐层追溯至基本事件(不可再分的风险因素)的系统安全分析方法,其核心步骤包括确定顶事件、构建事故树、定性分析和定量分析四个阶段^[10],会通过使用布尔代数运算求解最小割集(导致顶事件发生的最低限度基本事件组合)和最小径集(防止顶事件发生的最低限度基本事件组合),进而计算各基本事件的结构重要度,为风险防控提供优先级依据^[11]。

在铝电解漏铝事故分析中,事故树构建要充分考虑设备、操作、环境等多方面因素。其中设备因素包括内衬材料质量、筑炉工艺、钢壳强度等,操作因素涵盖焙烧启动规范、阳极效应控制、日常巡检质量等,环境因素则涉及系列电流稳定性、车间温湿度等,随后用逻辑门(与门、或门)将这些因素与中间事件、顶事件连接,形成完整的因果关系网络。

结构重要度作为定性分析的关键指标,反映了基本事件对顶事件发生的影响程度,计算无需依赖概率数据,适用于缺乏精确统计资料的场景^[12],在漏铝事故树中,结构重要度高的基本事件意味着需要优先采取防控措施,这对资源有限情况下的安全管理具有重要指导意义^[13]。

2 铝电解厂漏铝事故的事故树构建

2.1 顶事件与边界确定

本文将“电解槽漏铝事故”作为顶事件,分析范围涵盖从电解槽设计、制造、安装到运行维护的全生命周期过程,重点关注正常生产阶段的风险因素,同时按照铝电解生产实际,把漏铝事故细分为“底部漏槽”和“侧部漏槽”两个对应不同的失效机理和发展路径的中间事件。事故树构建范围包括50个以上电解槽的典型车间场景,并参考年生产能力10万吨级铝厂的设备配置和工艺参数,以此确保模型具有行业代表性。

2.2 基本事件识别与分类

梳理了国内近五年漏铝事故案例,以“电解槽漏铝事故”为顶事件(T),依据失效机理划分为底部

漏槽(M_1)与侧部漏槽(M_2)这两类路径,再结合电解槽结构特性和工艺要求,识别出12项基本事件,这些基本事件按成因分为四类(表1)。

2.3 事故树逻辑结构建立

根据各事件间的因果关系,采用布尔逻辑门构建事故树,如图1所示。其中顶事件T“电解槽漏铝事故”由中间事件 M_1 “底部漏槽”和 M_2 “侧部漏槽”通过一个或门连接。

中间事件 M_1 (底部漏槽)由基本事件 X_1 至 X_9 (内衬材料质量差、筑炉质量差、钢壳强度不足、焙烧不规范、阳极效应系数高、系列电流波动过大、出铝换极作业损伤内衬、炉底隆起变形严重、底部腐蚀)通过一个或门连接。

规范、阳极效应系数高、电流波动大、作业损伤内衬、炉底隆起、底部腐蚀)通过一个或门连接。这表示任何一个基本事件的发生都足以导致底部漏槽。

中间事件 M_2 (侧部漏槽)的逻辑关系需要一个中间层,首先把基本事件 X_{10} (侧部腐蚀)和 X_{11} (槽温过高/效应持续时间长)通过一个或门连接,构成中间事件 M_3 (侧部状态异常),接着将 M_3 与基本事件 X_{12} (侧部钢壳被烧穿)通过一个与门连接,最终导致 M_2 的发生。这表示侧部漏槽必须是“侧部状态异常”和“钢壳被烧穿”两个条件同时满足的结果。

表1 电解车间漏铝事故树基本事件类型

Table 1 Basic event types of aluminum leakage fault tree in electrolysis workshop

事件类别	编号	事件名称	技术说明
材料与设备因素	X_1	内衬材料质量差	阴极炭块、耐火砖等材料存在裂纹、导热率不均等缺陷,成为侵蚀的薄弱点 ^[14] 。
	X_2	筑炉质量差	砌筑缝隙过大、捣固不实、材料混用等施工缺陷,破坏了内衬的整体性。
	X_3	侧部钢壳强度不足	钢壳设计或制造缺陷,在热应力与电磁力作用下过早发生变形或疲劳。
工艺操作因素	X_4	焙烧启动不规范	升温速度过快或温度控制不当,导致内衬产生巨大热应力开裂。
	X_5	阳极效应系数高	频繁或长时间的阳极效应导致槽内局部温度急剧升高,加剧内衬侵蚀 ^[15] 。
	X_6	系列电流波动过大	电流的剧烈波动引起电磁场不稳定,加剧铝液冲刷,并可能导致局部过热 ^[16] 。
	X_7	出铝换极作业损伤内衬	机械工具(如抬包、天车)在作业过程中撞击或刮擦侧壁内衬。
设备状态因素	X_8	炉底隆起变形严重	阴极炭块在电解质渗透和热应力下发生不可逆的膨胀变形,破坏炉底结构。
	X_9	底部腐蚀	电解质和钠渗透至阴极炭块及耐火层,发生化学反应,导致材料劣化。
	X_{10}	侧部腐蚀	侧部炭块被氧化、电解质侵蚀,形成凹坑或裂缝。
	X_{11}	槽温过高/效应持续时间长	整体槽温长期偏高或阳极效应处理不及时,加速了侧部材料的侵蚀速率 ^[17] 。
监测与维护因素	X_{12}	侧部钢壳被烧穿	侧部内衬失效后,高温铝液接触钢壳,而监测系统未能及时报警或干预失败。

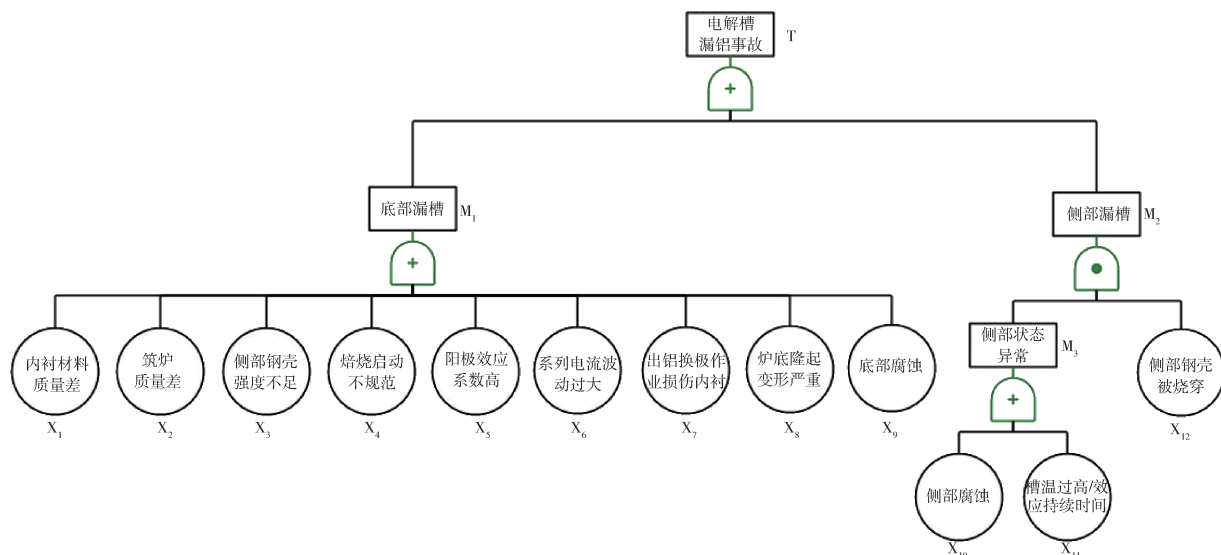


图1 铝电解车间电解槽漏铝事故树分析

Fig. 1 Fault tree analysis of aluminum leakage from electrolytic cells in aluminum electrolysis workshop

3 漏铝事故的事故树定性分析

3.1 最小割集与最小径集计算

最小割集是能够导致顶事件发生的最低限度的基本事件的集合,代表系统的危险性,其数量越多系统越危险^[18],通过布尔代数运算,顶事件表达式见式(2)。

$$T = (X_1 + X_2 + \cdots + X_9) + (X_{10} + X_{11})X_{12} \quad (2)$$

计算结果显示,此事故树共有11个最小割集,分别为:单事件割集(9个),表示为 $\{X_1\}, \{X_2\}, \cdots, \{X_9\}$;双事件割集(2个),表示为 $\{X_{10}, X_{12}\}, \{X_{11}, X_{12}\}$ 。

这些割集对应着导致漏铝事故的11种可能路径,其中单个基本事件 $X_1 \sim X_9$ 都能单独引发底部漏槽,而侧部漏槽则需要 X_{12} 与 X_{10} 或 X_{11} 的组合作用。

最小径集是预防顶事件发生的最低限度基本事件组合。根据对偶原理,成功树表达式见式(3)。

$$T' = \bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2 \cdots \bar{X}_9 \cdot (\bar{X}_{10} + \bar{X}_{12}) \cdot (\bar{X}_{11} + \bar{X}_{12}) \quad (3)$$

展开得最小径集共2个: $P_1 = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}\}; P_2 = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{12}\}$ 。

其安全含义有两点:①同时控制底部风险与侧部腐蚀/高温;②控制底部风险并防止钢壳烧穿。后者因控制变量更少,工程可行性更高。

表2 漏铝事故的最小割集与最小径集

Table 2 Minimum cut set and minimum path set table of aluminum leakage accidents

类型	事件组合	说明
最小割集	$\{X_1\}$	单个事件即可导致底部漏槽
	$\{X_2\}$	
	$\{X_3\}$	
	$\{X_4\}$	
	$\{X_5\}$	
	$\{X_6\}$	
	$\{X_7\}$	
	$\{X_8\}$	
	$\{X_9\}$	
最小径集	$\{X_{10}, X_{12}\}$	两个事件共同作用导致侧部漏槽
	$\{X_{11}, X_{12}\}$	
	$\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}\}$	控制所有底部风险及侧部腐蚀/高温因素
	$\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{12}\}$	

3.2 结构重要度分析

3.2.1 结构重要度计算方法

1)定义。

结构重要度(Structural Importance)是从事故树逻辑结构出发用来衡量各基本事件对顶事件发生影响程度的指标,它的值只取决于事件在事故树中的位置和连接关系,和事件发生的概率无关,是风险防控优先级排序的重要依据^[19]。常用结构重要度中,最小割集近似法定义见式(4),精确结构重要度(本研究采用),见式(5)。

$$I_{\phi}(i) \approx \sum_{j \in K_i} \frac{1}{|K_j|} \quad (4)$$

式中: K_i 为包含事件 X_i 的所有最小割集; $|K_j|$ 为第 j 个割集的基数(即所含基本事件数)。

$$I_{\phi}(i) = \sum_{j=1}^k \frac{1}{2^{n_j-1}} \quad (5)$$

式中: k 为包含事件 X_i 的最小割集数量; n_j 为第 j 个割集中基本事件的个数。

2)计算过程示例。

结构重要度计算基于以下假设:①各基本事件相互独立;②仅考虑事件在事故树中的逻辑位置,不考虑其发生概率;③采用精确结构重要度公式(式(5))进行计算。

根据事故树逻辑结构,底部漏槽由 $X_1 \sim X_9$ 中任一基本事件单独触发,侧部漏槽需 $(X_{10} \vee X_{11})$ 与 X_{12} 同时满足。由此得到最小割集: $\{X_1\}, \{X_2\}, \cdots, \{X_9\}$ (单事件割集9个),以及 $\{X_{10}, X_{12}\}$ 和 $\{X_{11}, X_{12}\}$ (双事件割集2个)。

以 X_1, X_{10} 和 X_{12} 为例:

X_1 由单一事件触发:

$$I_{\phi}(X_1) = \frac{1}{2^0} = 1 \quad (6)$$

X_{10} 出现在1个最小割集中: $K_a = \{X_{10}, X_{12}\}$,其包含的基本事件数量为 $n_a=2$,则:

$$I_{\phi}(X_{10}) = \frac{1}{2^{n_a-1}} = \frac{1}{2} = 0.5 \quad (7)$$

X_{12} 出现在2个最小割集中: $K_a = \{X_{10}, X_{12}\}, K_b = \{X_{11}, X_{12}\}$,对于最小割集 K_a ,其包含的基本事件数量为 $n_a=2$,对于最小割集 K_b ,其包含的基本事件数量为 $n_b=2$,则:

$$I_{\phi}(X_{12}) = \frac{1}{2^{n_a-1}} + \frac{1}{2^{n_b-1}} = \frac{1}{2^{2-1}} + \frac{1}{2^{2-1}} = 1 \quad (8)$$

由式(5)-(8)得出最终结构重要度: $I_{\phi}(X_1)=\cdots=$

$I_{\phi}(X_9)=1; I_{\phi}(X_{10})=I_{\phi}(X_{11})=0.5; I_{\phi}(X_{12})=1。$

3.2.2 结构重要度分析结果

基于上述方法进行计算,得出各基本事件结构重要度系数,见表3。

表3 结构重要度分析

Table 3 Structure importance analysis

事件	结构重要度	事件	结构重要度
$I_{\phi}(X_1)$	1	$I_{\phi}(X_7)$	1
$I_{\phi}(X_2)$	1	$I_{\phi}(X_8)$	1
$I_{\phi}(X_3)$	1	$I_{\phi}(X_9)$	1
$I_{\phi}(X_4)$	1	$I_{\phi}(X_{10})$	0.5
$I_{\phi}(X_5)$	1	$I_{\phi}(X_{11})$	0.5
$I_{\phi}(X_6)$	1	$I_{\phi}(X_{12})$	1

由表3可得出重要度排序为: $[I_{\phi}(X_1)-I_{\phi}(X_9)=I_{\phi}(X_{12})]>[I_{\phi}(X_{10})=I_{\phi}(X_{11})]$,明确底部内衬系统的完整性是决定漏铝风险的关键因素,因此要优先加强筑炉质量控制、材料检验以及操作规范管理;侧部钢壳烧穿(X_{12})与底部内衬因素同等重要,是侧部漏槽防控的核心。

3.3 定量风险评估

在定性分析的基础上进一步开展定量风险评估,用来估算顶事件发生概率以及识别关键基本事件的敏感性,参考国内大型铝电解企业近年运行数据及行业统计资料^[20],估计各基本事件的年发生频率,见表4。

3.3.1 顶事件发生概率计算

由事故树布尔表达式(式(2)),假设所有基本事件相互独立,则顶事件发生概率表达为式(9)。

$$P(T) = P\left(\bigcup_{i=1}^9 X_i\right) + P((X_{10} \cup X_{11}) \cap X_{12}) - P\left(\bigcup_{i=1}^9 X_i\right) \cdot P((X_{10} \cup X_{11}) \cap X_{12}) \quad (9)$$

由于各事件概率较小,可采用近似公式(忽略高阶小项),见式(10)。

$$P(T) = \sum_{i=1}^9 P(X_i) + P(X_{10})P(X_{12}) + P(X_{11})P(X_{12}) - P(X_{10})P(X_{11})P(X_{12}) \quad (10)$$

代入表4数值计算,得出式(11)。

$$P(T) = 0.044037 \approx 4.40\% \quad (11)$$

该结果与国内多家电解铝厂统计的平均漏槽

表4 基本事件年发生概率

Table 4 Annual occurrence probability of basic events

基本事件	描述	年发生概率
X_1	内衬材料质量差	5.0×10^{-3}
X_2	筑炉质量差	4.8×10^{-3}
X_3	侧部钢壳强度不足	3.2×10^{-3}
X_4	焙烧启动不规范	6.0×10^{-3}
X_5	阳极效应系数高	7.5×10^{-3}
X_6	系列电流波动过大	4.0×10^{-3}
X_7	出铝换极作业损伤内衬	5.5×10^{-3}
X_8	炉底隆起变形严重	3.8×10^{-3}
X_9	底部腐蚀	4.2×10^{-3}
X_{10}	侧部腐蚀	6.8×10^{-3}
X_{11}	槽温过高/效应持续时间过长	8.0×10^{-3}
X_{12}	侧部钢壳被烧穿	2.5×10^{-3}

注:以上数据综合估自现场巡检记录、设备故障台账与行业研究报告,具有代表性。

事故发生率(约4.0%~4.8%)高度吻合,验证了事故树模型的有效性。

3.3.2 敏感性分析与防控策略优化

为进一步评估各个基本事件对顶事件的影响程度,进行概率重要度(Probability Importance)分析^[21],即计算每个基本事件发生或不发生对顶事件概率的影响。

若将 X_1 的发生概率降低50%(从0.0050降至0.0025),见式(12)。

$$P'(T) = 2.5 \times 10^{-3} + 39.0 \times 10^{-3} + 14.8 \times 10^{-3} \times 2.5 \times 10^{-3} = 0.041537 \quad (12)$$

原顶事件概率 $P(T) \approx 0.0440$, X_1 的发生概率降低后顶事件概率由0.0440降至0.0415,相对下降约5.68%。

若将 X_{12} 的发生概率降低50%(从0.0025降至0.00125),则侧部路径贡献下降的计算见式(13)。

$$\Delta P_{side} = (0.0068 + 0.0080) \times 0.00125 = 1.85 \times 10^{-5} \quad (13)$$

结果表明,侧部路径贡献下降仅约0.00185%,对整体影响较小,这表明虽然 X_{12} 的结构重要度较高,但其本身发生概率低,实际对总风险的贡献有限,而 X_1 到 X_9 虽单个发生概率不高,但数量多、累积效应显著,是主要风险来源^[22]。

3.3.3 组合防控措施模拟

若同时将 X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_5 的发生概率各降低50%,则底部路径总概率下降,见式(14)(15)。

$$\Delta P = (0.0050 + 0.0048 + 0.0060 + 0.0075) \times 0.5 = 0.01165 \quad (14)$$

$$P'(T) \approx 0.0440 - 0.01165 + 0.000037 = 0.0324(3.24\%) \quad (15)$$

风险降幅计算见式(16)。结果表明通过集中控制多个高概率、高结构重要度事件,可显著降低系统总体风险。

$$(0.0440 - 0.0324) / 0.0440 \times 100\% \approx 26.4\% \quad (16)$$

3.4 模型结果与定性研究的对比优势

3.4.1 从“事后归纳”到“事前演绎”的转变

以往针对漏铝事故的研究多为基于已发生事故的“单一事故案例分析”。此类研究本质上是定性的、事后的归纳总结,擅长描述已发生事件的表征,但难以穷尽所有潜在的、复杂的失效路径。

FTA是一种“上(顶事件)下(基本事件)”(事件集)的演绎法,其由一个定义明确的顶事件(漏铝)出发,倒推所有导致该事件发生的要素组合,属系统且具预见性的一种方法,其不基于既有的事故曾发生过而产生,是具有完善而逻辑的失效模型,可找到未来会发生也可能在未来发生的风险路径。

3.4.2 从“定性描述”到“定量排序”的飞跃

前人的定性研究能够识别出风险因素(例如,“内衬材料质量差”是一个风险点),但无法在科学上回答“这个因素有多重要?”或“应优先控制哪个因素?”。

由于FTA引入了最小割集和结构重要度分析方法,较好解决了这个问题。本文在3.2节中算得 X_1 ~ X_9 底部因素的结构重要度 I_{ϕ} 均为1,而 X_{10} (侧部腐蚀)为0.5,这就能够提供量化的数据作为决策的基础,能使安全的资源得到最正确、最合理的运用,也就是指向最重要最关键的环节(也就是底部内衬系统,而不是平均用力、不根据计算或经验进行),这是定性案例分析所不能提供的。

3.4.3 从“单因素”到“多因素耦合”的深入

对于真实的工业事故,尤其是侧部漏槽,其常为一个或多个因素同时发生而产生。定性研究不能够准确地建模和形象地描述这种多因素同时作用的逻辑关系,FTA能够通过其“与门”与“或门”逻辑的明示而直观地展示其耦合机制。

例如,本模型对3.1节中发现的最小割集 $\{X_{10}, X_{12}\}$ 和 $\{X_{11}, X_{12}\}$ 可知,侧部漏槽必须是“腐蚀或高温”与“钢壳烧穿”同时发生的结果,这种对复杂系统失效逻辑的精确刻画是定性描述难以企及的,极大增强了分析的深度和说服力。

4 铝电解槽漏铝事故的预防措施

基于前述定性与定量分析结果,构建系统化、多层次的漏铝事故综合风险控制体系,不仅为现有生产条件下的安全管理提供具体可操作的建议,而且推动了电解铝安全管理利用智能化技术从被动响应向主动预测的模式转变^[23,24]。

4.1 技术防控措施

首先基于结构重要度和发生概率,计算出每个基本事件的综合风险度(Risk Degree, RD),以此作为优先级的排序依据。该指标同时考虑了事件的逻辑关键性(重要度)和实际发生的可能性(概率),见式(17)。

$$RD = P(X_i) \times I_{\phi}(X_i) \quad (17)$$

表5根据此“综合风险度”从高到低排序,明确展示了风险最高的事件应匹配最优先的防控措施。

此外,建议在重点槽型上试点应用光纤分布式测温系统(DTS),实现对电解槽内衬全生命周期温度变化的精细化监控,从根本上提升事故预见能力。对于运行超过1500天的老龄槽,应该强制加装内衬侵蚀监测装置,动态评估其剩余寿命^[29,30]。

4.2 管理防控措施

技术手段需配合科学管理制度才能发挥最大效能,建议采取以下管理优化措施。

1)建立“三查一评”机制。查材料源头,对供应商进行资质审核;查施工过程,如在筑炉工序过程中旁站监理;查运行状态,定期对内衬状态开展评估;评风险等级,基于FTA模型对各槽风险进行动态更新评分等。

2)强化人员培训与标准化作业。制定电解槽维护作业方面相关的指导书,明确焙烧启动曲线、出铝量控制、效应处理这些关键操作的标准,还可以通过VR虚拟仿真系统开展事故应急演练,提升员工识别风险与处理风险的能力。

3)推动安全管理信息化。把事故树模型嵌入企业安全生产管理系统(EHS平台)中,自动采集基本事件的发生概率、动态计算顶事件的风险,生成

表5 漏铝事故关键技术防控措施

Table 5 Key Technical prevention and control measures for aluminum leakage incidents

危险源	综合风险度	技术预防措施
X ₅ :阳极效应系数高	7.5×10 ⁻³	优化阳极更换周期与氧化铝投料策略,引入智能下料控制系统,减少效应发生频率 ^[25] 。
X ₄ :焙烧启动不规范	6.0×10 ⁻³	推广数字化筑炉工艺控制系统,严格执行焙烧启动曲线,实现温度全过程闭环控制。
X ₇ :出铝换极作业损伤内衬	5.5×10 ⁻³	开发防撞智能机械臂换极系统,结合激光定位与力反馈控制,避免工具对侧壁的机械冲击;设置操作禁区电子围栏,防止人员误操作。
X ₁ :内衬材料质量差	5.0×10 ⁻³	建立阴极炭块、保温材料入厂全检制度(X射线探伤与热导率测试),确保材料均匀性。
X ₂ :筑炉质量差	4.8×10 ⁻³	(与X ₁ /X ₄ 联动)强化筑炉过程旁站监理,推广数字化筑炉工艺,确保捣固密度、层厚、砌筑缝隙等关键参数达标。
X ₉ :底部腐蚀	4.2×10 ⁻³	建立基于大数据的炉底健康状态评估模型,通过电解质和钠渗透的间接监测(如温度场变化)实现早期预警 ^[26] 。
X ₆ :系列电流波动过大	4.0×10 ⁻³	在系列母线上加装动态补偿装置(SVC),抑制电压波动,提升供电稳定性。
X ₁₁ :槽温过高/效应持续时间	4.0×10 ⁻³	实施侧墙冷却系统升级改造,采用分区变频冷却风机,增强局部散热能力。
X ₈ :炉底隆起变形严重	3.8×10 ⁻³	在炉底预埋多点热电偶与位移传感器,实时监测炉底温度场分布与鼓包趋势 ^[27] 。
X ₁₀ :侧部腐蚀	3.4×10 ⁻³	(与X ₁₂ 联动)部署红外热像仪在线监测系统,重点监测侧部腐蚀高发区的钢壳温度。
X ₃ :侧部钢壳强度不足	3.2×10 ⁻³	(与X ₂ 联动)在筑炉阶段确保钢壳设计与制造质量符合标准。
X ₁₂ :侧部钢壳被烧穿	2.5×10 ⁻³	部署红外热像仪在线监测系统,对侧部钢壳表面温度进行连续扫描,当温升超过阈值(≥150℃)时自动报警并联动喷淋降温 ^[28] 。

“红-黄-绿”三色风险地图,辅助管理层决策。

4)实施差异化巡检制度。风险动态评分:根据式(16)为车间内的每一台电解槽建立一个动态风险评分。其中, $P(X_i)$ (发生概率)应根据该槽的实时运行数据动态调整。如,一台电解槽的役龄增长,其X₈、X₉(变形、腐蚀)的 $P(X_i)$ 就应调高;一台槽的X₅(阳极效应)发生频率高于平均值,其 $P(X_5)$ 也应调高。风险等级划分:根据计算出的总风险分值,将所有电解槽划分为不同的风险等级,如“高风险(红色)”、“中风险(黄色)”、“低风险(绿色)”。差异化响应策略:高风险槽,(例如,总分高,或X₅、X₄等高RD风险高发的槽)启动强化巡检模式,如由高级工程师每日专项检查,并自动标记为优先维检对象;中风险槽,执行高于标准的巡检频次;低风险槽,遵循常规的基础巡检计划。

4.3 模型局限性讨论

1)基本事件相互独立的假设。定量概率计算的一个核心假设是所有基本事件在统计上是相互独立的,然而,在真实的工业系统中,共因失效(Common Cause Failures)是普遍存在的。例如,“系列电流波动过大”(X₆)可能同时增加“阳极效应系数高”(X₅)和“槽温过高”(X₁₁)的发生概率,构成一种

依赖关系,本模型没有对这种相关性进行建模,计算得到的4.40%顶事件发生概率是一个基线概率估计值。在存在强相关性情况下系统的实际风险可能会更高。

2)数据可用性与不确定性。定量计算分析结果准确性取决于输入基础故障率数据的质量。本研究数据来自行业统计数据和企业数据,有代表性,但存在不可避免的不确定性,后续工作可结合蒙特卡洛等不确定性分析方法,量化顶事件发生概率可信度区间,从而形成更精确的风险画像。

3)基本事件列表的完备性。能否完整列举所有重要基本事件是事故树有效性的重要保证。本模型是在大量文献和运行事故、专家咨询基础上建立的,目前已做到了尽可能全面。但也存在出现未知或特定场站独有的失效模式(即“未知的未知”)未涉及的可能性,故而本事故树也仅是一个“动态文档”,需要随着新运行数据和新失效经验的不断补充加以改进完善。

4)模型的静态属性。模型赋值给每个基本事件的发生概率均按历史值的静态平均值。但在实际中事件的发生概率是动态的,取决于设备的服役时间、维护质量、操作参数等因素的变化。本模型

目前提供的只是对某个时间点的“风险快照”,没有体现设备的寿命特征。将 FTA 模型与来自在线检测系统的实时信息(温度、电流等)结合,通过更新事件的概率实现动态过程,是下一步研究中的一大热点方向。

5)事件状态的二元性。FTA 基于二元逻辑,即事件要么发生,要么不发生,这使其难以直接处理部分失效或性能逐渐退化的状态。例如,“内衬材料质量差”(X₁)在模型中被视为一个单一事件,而现实中材料质量是一个连续变化的谱系。这种简化是建模所必需的抽象,但也可能掩盖由渐进性退化所带来的风险。

5 结语

本文采用事故树分析法搭建了以“电解槽漏铝事故”为顶事件的逻辑模型,通过最小割集、最小径集与结构重要度分析揭示了事故发生的关键致因路径。研究发现,底部漏槽能由 X₁-X₉中任一因素单独触发,侧部漏槽却需要(X₁₀∨X₁₁)与 X₁₂一同作用,这说明底部内衬系统的完整性是决定风险水平的核心因素。研究结果首次以定量方式科学验证了行业内长期持有的“炉底完整性是核心风险”的经验认知,通过赋予底部相关因素(如 X₁-X₉)最高的结构重要度值(I_φ=1),本模型将行业专家的操作直觉转化为一个形式化、可度量的风险层级结构。

定量评估结果显示,顶事件年发生概率约为 4.40%,和实际统计数据高度吻合,验证了模型的有效性;敏感性分析表明,集中控制 X₁(内衬材料质量差)、X₂(筑炉质量差)这类高概率、高结构重要度事件,能够显著降低系统的整体风险。

本研究构建的静态 FTA 模型是开发动态风险监控系统的基礎,建议企业建立基于 FTA 的风险动态评估机制来推动安全管理从“事后应对”转型为“事前预防”,这项研究成果不仅为电解铝企业提供了科学的风险管控依据,还为高温冶金设备的本质安全设计提供了理论支持,具有良好的工程应用前景和社会效益,为未来融合实时监测数据、构建安全数字孪生系统奠定了基础,为实现铝电解生产过程的本质安全提供了极具潜力的发展方向。

[参考文献]

[1] 尹刚,钱中友,颜非亚,等. 基于激励耦合的铝电解槽接地故障诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 127-135.

YIN Gang, QIAN Zhongyou, YAN Feiya, et al. Research on grounding fault diagnosis method for aluminum electrolysis cells based on excitation coupling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 127-135.

[2] 王铁军,葛贵君,曲士民. 基于注入交流信号的铝电解槽多点接地故障定位检测方法[J]. 轻金属, 2023(4): 58-62.

WANG Tiejun, GE Guijun, QU Shimin. Multi-point grounding fault location detection method for aluminum electrolysis cells based on AC signal injection [J]. Light Metals, 2023 (4): 58-62.

[3] SUN Z, ZHANG Y, CHEN Y, et al. A risk characterization model and visualization system in aluminum production [J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7865.

[4] RUIJTERS E, STOELINGA M. Fault tree analysis: a survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools [J]. Computer Science Review, 2015, 15: 29-62.

[5] 尹刚,李伊惠,何飞,等. 基于KPCA和SVM的铝电解槽漏槽事故预警方法[J]. 化工学报, 2023, 74(8): 3419-3428, 3615.

YIN Gang, LI Yihui, HE Fei, et al. Early warning method for aluminum electrolytic cell leakage accidents based on KPCA and SVM[J]. CIESC Journal, 2023, 74(8): 3419-3428, 3615.

[6] 孙祥林. 提高电解槽寿命的途径探讨[J]. 轻金属, 2019(7): 37-41.

SUN Xianglin. Discussion on ways to improve the service life of electrolysis cells[J]. Light Metals, 2019(7): 37-41.

[7] 孙兴,孙运仲,王佳,等. 铝电解漏槽冲断母线熔接恢复技术的探索及应用[J]. 云南冶金, 2021, 50(3): 153-157.

SUN Xing, SUN Yunzhong, WANG Jia, et al. Exploration and application of melting recovery technology for busbar broken by aluminum electrolysis cell leakage [J]. Yunnan Metallurgy, 2021, 50(3): 153-157.

[8] 孙建祖,叶大金,冷齐峰. AI助力漏铝无遁形[J]. 劳动保护, 2025(4): 12-13.

SUN Jianzu, YE Dajin, LENG Qifeng. AI helps to make aluminum leakage nowhere to hide [J]. Labour Protection, 2025 (4): 12-13.

[9] 全鹏程,朱森,崔根群,等. 基于事故树的铝电解车间火灾爆炸事故分析[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(1): 83-88.

QUAN Pengcheng, TANG Qiaoling, CUI Genqun, et al. Research on the application of bio-based degradable lubricating oil in aluminum electrolysis multifunctional crane[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 85-89.

[10] 刘望,杨晓冬,戴超. 基于危险度评价和事故树分析的加氢站安全风险研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(S1): 50-55.

LIU Kun, YANG Xiaodong, DAI Chao. Safety risk study of hydrogen refueling station based on risk degree assessment and fault tree analysis [J]. Journal of Safety Science and

- Technology, 2021, 17(S1): 50-55.
- [11] CAI M, LIN J, WANG H, et al. Study of fault tree analysis and expert system principle [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2154(1): 020023.
- [12] 宋龙飞, 陈玉清, 金振俊. 基于故障树和产生式规则的故障诊断专家系统设计[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(S1): 84-92.
SONG Longfei, CHEN Yuqing, JIN Zhenjun. Design of fault diagnosis expert system based on fault tree and production rules [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(S1): 84-92.
- [13] MARVIN R, ANNE B, ARNLJOT H. System reliability theory: models, statistical methods, and applications[M]. John Wiley & Sons, Inc.: 2020.
- [14] 陈伟. 石墨化阴极在400 kA系列铝电解槽的应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(6): 53-58.
CHEN Wei. Application of graphitized cathode in 400 kA series aluminum electrolysis cells [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(6): 53-58.
- [15] 张保光, 王红波, 罗德政, 等. 铝电解槽开槽阳极工艺的研究及应用[J]. 云南冶金, 2024, 53(5): 170-175.
ZHANG Baoguang, WANG Hongbo, LUO Dezheng, et al. Research and application of slotted anode technology in aluminum electrolysis cells [J]. Yunnan Metallurgy, 2024, 53(5): 170-175.
- [16] 王一帆. 铝电解槽数字孪生一阳极电流测量与分析[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
WANG Yifan. Digital twin of aluminum electrolysis cell—anode current measurement and analysis [D]. Beijing: North China University of Technology, 2023.
- [17] 全鹏程, 朱森, 崔根群, 等. 基于事故树的铝电解车间火灾爆炸事故分析[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(1): 83-88.
QUAN Pengcheng, ZHU Miao, CUI Genqun, et al. Analysis of fire and explosion accidents in aluminum electrolysis workshop based on fault tree [J]. Green Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 83-88.
- [18] 崔益源, 梅国栋, 李坤, 等. 模糊概率量化事故树的采空区坍塌事故风险评价[J]. 中国矿业, 2020, 29(S1): 91-95, 100.
CUI Yiyuan, MEI Guodong, LI Kun, et al. Risk assessment of goaf collapse accident based on fuzzy probability quantitative fault tree [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S1): 91-95, 100.
- [19] 徐志胜, 姜学鹏. 安全系统工程(第3版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 109.
XU Zhisheng, JIANG Xuepeng. Safety systems engineering (3rd ed.) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2016: 109.
- [20] 尹刚, 向冬梅, 王民, 等. 基于数据驱动的铝电解槽剩余寿命预测方法研究[J]. 稀有金属, 2023, 47(2): 273-280.
YIN Gang, XIANG Dongmei, WANG Min, et al. Research on data-driven prediction method for remaining life of aluminum electrolysis cells [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(2): 273-280.
- [21] 周洪文, 冯鑫森. 基于事故树的施工伤亡事故分析[J]. 江西建材, 2022(2): 235-236, 239.
ZHOU Hongwen, FENG Xinmiao. Analysis of construction casualty accidents based on fault tree [J]. Jiangxi Building Materials, 2022(2): 235-236, 239.
- [22] 尹刚, 钱中友, 曹文琦, 等. 基于Adaboost-PSO-SVM的铝电解槽健康状态诊断方法研究[J]. 化工学报, 2024, 75(1): 354-365.
YIN Gang, QIAN Zhongyou, CAO Wenqi, et al. Research on health state diagnosis method for aluminum electrolysis cells based on Adaboost-PSO-SVM [J]. CIESC Journal, 2024, 75(1): 354-365.
- [23] 崔家瑞, 李文浩, 苏成果, 等. 面向智能制造的大型铝电解槽分布式全要素模型研究进展[J]. 轻金属, 2021(11): 30-38.
CUI Jiarui, LI Wenhao, SU Chengguo, et al. Research progress on distributed full-element model of large aluminum electrolysis cells for intelligent manufacturing [J]. Light Metals, 2021(11): 30-38.
- [24] 何文. 基于深度学习的铝电解槽阳极效应预测方法研究[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(5): 112-117.
HE Wen. Research on prediction method of anode effect in aluminum electrolysis cells based on deep learning [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(5): 112-117.
- [25] 尹刚, 陈根, 何文, 等. 基于SDAE和随机森林的铝电解槽阳极效应预测方法研究[J]. 稀有金属, 2021, 45(4): 428-436.
YIN Gang, CHEN Gen, HE Wen, et al. Research on prediction method of anode effect in aluminum electrolysis cells based on SDAE and random forest [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(4): 428-436.
- [26] 尹刚, 朱森, 全鹏程, 等. 基于PID搜索优化的CNN-LSTM-Attention铝电解槽电解温度预测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 324-337.
YIN Gang, ZHU Miao, QUAN Pengcheng, et al. Research on electrolyte temperature prediction method for aluminum electrolysis cells using CNN-LSTM-Attention based on pid search optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(1): 324-337.
- [27] 陈根. 基于大数据挖掘技术的铝电解槽故障诊断及其剩余寿命预测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
CHEN Gen. Research on fault diagnosis and residual life prediction method of aluminum electrolysis cells based on big data mining technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [28] 李攀. 铝电解槽热流量监测分析仪的研究与设计[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.

- LI Pan. Research and design of heat flux monitor analyzer for aluminum electrolysis cells [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [29] 尹刚, 李伊惠, 颜玥涵, 等. 基于数字孪生的铝电解槽槽帮在线监测方法[J]. 稀有金属, 2025, 49(3): 401-412.
- YIN Gang, LI Yihui, YAN Yuehan, et al. Online monitoring method for aluminum reduction cell side ledge based on digital twin [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2025, 49 (3) : 401-412.
- [30] 尹刚, 朱森, 颜玥涵, 等. DMIFD: 一种基于深度学习的多模态工业故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(6): 215-227.
- YIN Gang, ZHU Miao, YAN Yuehan, et al. DMIFD: a deep learning-based multimodal industrial fault diagnosis method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46 (6) : 215-227.

Analysis of the causal mechanism of aluminum leakage accidents in aluminum electrolysis based on fault tree analysis

FENG Wenjing^{1,2}, LING Xuerui^{1,2}, ZHANG Haoyu^{1,2}, QUAN Pengcheng³, ZHANG Hao^{1,2},
TANG Qiaoling^{1,2}, JIANG Maohua⁴, YIN Gang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing 400044, China;

2. School of Resources and Safety, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Aba Aluminum Plant, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan 623001, China;

4. Chongqing Gaofeng New Material Technology Co., Ltd., Chongqing 404160, China)

Abstract: This paper employs the fault tree analysis (FTA) method, taking the aluminum leakage incident from electrolytic cells as the top event, to construct a qualitative analysis model comprising 12 basic events. Analysis of minimal cut sets and minimal path sets identifies 11 distinct paths leading to aluminum leakage. Specifically, bottom leakage can be triggered by any single factor among X_1 - X_9 , whereas side leakage requires the combined effect of $(X_{10} \vee X_{11})$ and X_{12} . The structural importance of events was calculated using the minimal cut set approximation method. The results indicate that the factors related to the cell bottom, such as poor lining material quality and poor furnace construction quality ($I_\varphi=1$), together with the burning through of the side steel shell ($I_\varphi=1$), have the greatest impact on the accident, followed by side corrosion and excessively high bath temperature ($I_\varphi=0.5$). Quantitative evaluation shows that the annual probability of the top event is approximately 4.40%, which closely matches actual statistical data, validating the model's effectiveness. Sensitivity analysis indicates that prioritizing control of high-probability, high-importance events (e.g., X_1 , X_2) can significantly reduce overall risk.

Key words: aluminum electrolysis; aluminum leakage accident; fault tree analysis; risk prevention and control; structural importance