

基于事故树的铝电解车间火灾爆炸事故分析

全鹏程¹ 朱森² 崔根群¹ 李伊惠² 向禹³ 曹文琦¹ 许亨权¹ 左玉海⁴
郝林¹ 李刚¹ 刘明川¹ 练骋¹ 钱中友² 唐蜜⁵ 尹刚²

(1. 阿坝铝厂, 四川阿坝藏族自治州 623001; 2. 重庆大学资源与安全学院, 重庆 400044;
3. 陆军工程大学通信士官学校, 重庆 400035; 4. 青海海源绿轮制造有限公司, 青海 810000;
5. 中玺绿碳(重庆)科技有限公司, 重庆 400042)

[摘要] 本文对某铝厂电解车间的火灾爆炸危险源进行识别,并通过建立完整的事故树找出可能引发电解车间火灾爆炸事故的原因。以火灾事故作为顶事件,通过分析最小割集、最小径集以及各基本事件的结构重要度排序,发现炉帮破坏、电压监护不到位、母线短路口处意外短接等基本事件对火灾事故的影响较大。针对可能导致事故的原因,分别从工艺技术和安全管理两个方面提出了改进措施。在工艺技术方面,建议加强炉帮的维护和检查、加强阴极软连接的监测、加强电压监护系统的设置和维护等;在安全管理方面,建议加强员工的安全培训和教育、建立完善的安全管理制度和操作规程、加强设备的定期检查和维护等,以有效预防铝电解厂火灾爆炸事故的发生。

[关键词] 铝电解; 事故树分析; 火灾爆炸危险源; 工艺技术; 安全管理

[中图分类号] TF821 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)01-0083-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.01.014

0 前言

当下,建筑、航空、电力输送以及汽车制造等领域正在蓬勃发展,而金属铝在其中担当着重要角色。铝的轻质性能和强度既减轻了结构的重量,又使得结构更加稳固,有助于降低结构整体负荷。在航空和汽车制造领域,铝被用于制造机身、车身和其他部件,以实现轻量化设计,从而降低飞机和汽车的整体重量,提高燃油效率和整体性能。由于铝具有良好的导电性,也被广泛用于电力输送线路的导线中。金属铝大多都是通过铝电解工艺得到的,可重复利

用,环保性能良好,这也使得铝电解行业不断发展壮大。与此同时,铝电解厂的事故也在不断发生。铝电解车间的生产环境恶劣,槽况复杂,参数繁多^[1],易发生起重机械伤害事故、高处坠落事故、电气伤害事故和火灾爆炸事故,其中火灾爆炸事故是最频发的事故。

目前,有关铝电解车间火灾爆炸事故的原因及其影响程度的研究较少,因此本文采用事故树分析法对铝电解车间的火灾爆炸事故进行分析,找出事故原因并分析其影响程度,然后根据分析结果制定相应的措施,以有效防止事故再次发生。这对于提高生产效率、减少经济损失具有重要的意义^[2],同时为铝厂在预防火灾爆炸事故的安全决策方面提供参考。

1 铝电解工艺流程

在现代铝电解工业中,通常采用冰晶石-氧化铝熔盐电解法,铝电解槽是核心生产设备^[3]。

实际生产中使用高温的熔融冰晶石作为溶剂,以氧化铝作为溶质,以炭素体作为阳极,以铝液作为阴极,在950~970℃的温度条件下,在电解槽两极上进行电化学反应^[4]。

铝电解工艺流程如图1所示。

[收稿日期] 2023-08-24

[基金项目] 重庆英才·创新创业示范团队项目(CQYC202203091061);科技转化重大项目(H20201555)

[作者简介] 全鹏程(1979—),男,重庆人,本科,工程师,主要从事有色金属冶炼及管理。

[通讯作者] 朱森(2000—),女,四川达州人,硕士研究生,主要研究方向为有色金属冶炼、机器学习与数据挖掘。

[引用格式] 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 Pengchen, ZHU Miao, CUI Genqun, et al. Analysis of fire and explosion accidents in aluminum electrolysis workshop based on accident tree[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 83-88.

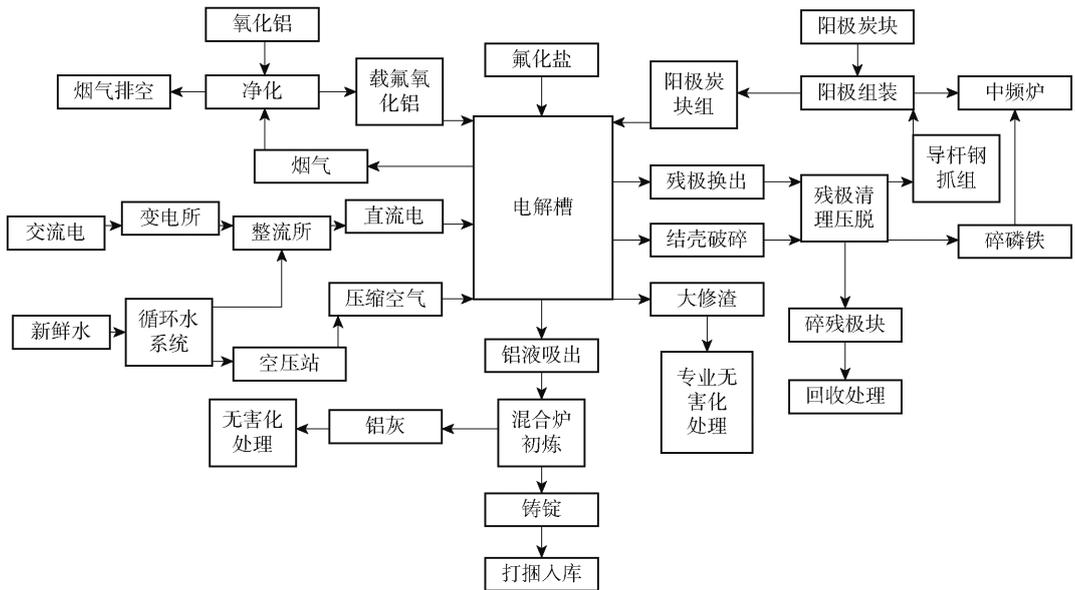


图1 铝电解工艺流程

在铝电解过程中,当局部冰晶石开始熔解在液体电解质中,经过一段时间焙烧后,阳极的导电性将显著提升,同时因为其电阻小,处于相同的电压条件下,电流就会增大,发热量也会增多,因此,冰晶石的熔化速度加快,使得阳极电阻进一步降低,最终形成不良循环,导致焙烧过程中阳极电流分布不均。当电流分布不均匀,就会出现电流偏流,从而引起某个阳极电流过大,产生过多的热量,造成阳极钢爪熔爪,继而出现单个阳极脱爪。长时间如此,大量钢爪连续脱爪,从而引起阴阳两极短路,造成铝电解槽短路口爆炸^[5]。

2 铝电解车间火灾危险源辨识

随着社会现代生产工艺技术的发展,铝电解生产面临着诸多的风险隐患,当铝电解厂的规模日益扩大,旧设备逐渐老化和新设备操作不熟练问题增加,发生火灾爆炸事故的风险也逐渐增加。因此,对铝电解车间的火灾风险隐患排查和危险源分析就尤为重要。

2.1 铝电解车间火灾爆炸因素分析

1) 如果铝电解槽因设备缺陷或其他外部因素发生泄漏,泄漏的高温铝液与空气接触后会引燃,导致火灾。如果电解槽中有水(从车间进入的雨水等),则会因水的急剧膨胀而发生剧烈爆炸。

2) 在异常高电压的作用下,温度会升高,绝缘层会受损形成短路,最终造成短路口爆炸。如果正负母线短路口处发生意外的短接,可能会导致压接

面爆炸,造成严重的后果。

3) 铝电解生产中的粉尘主要包括铝合金粉尘和氧化铝、氟化铝等。如果铝电解槽在生产时出现密闭罩密闭不严或者机械排烟系统发生故障等问题,都可能导致粉尘泄漏^[6],如果清理不及时,造成粉尘积聚,遇到火花时就极易引发粉尘爆炸事故。

4) 对出铝作业电压监护不到位;阳极由于人为失误而过度升高;当电解液液位过低,槽内温度过低,导致电解质下沉,这些问题都会引起阳极脱离电解质形成断路,最终发生短路口爆炸。

2.2 铝电解车间火灾爆炸事故分析

铝电解车间火灾爆炸事故主要有漏炉事故、短路口爆炸事故、整流柜爆炸事故、铝粉尘爆炸事故等,其中漏炉事故和短路口爆炸事故占大多数。

铝电解槽漏炉事故是铝冶炼行业最常见的事故之一,通常出现在焙烧完成后和生产开始时,且通常出现在电解槽底部,特别是钢板和阴极的接合面^[7]。无论是漏炉前还是漏炉期间,都会导致严重的后果。如果采取有效的预防措施,可以防止电解质或铝液的进一步泄漏,从而减少对整个铝电解槽生产过程的不利影响。如管理不当或未及时处理,当铝液或电解液熔化并从槽体内泄漏时,阴极母线会被冲断,引发火灾和爆炸事故。

短路口爆炸是铝厂常见的另一种事故,它可能发生在铝电解槽整个运行周期中。在断路器上,引起短路口爆炸的原因主要有两种:断路和短路。电解系列是一条强电流的闭合回路,当铝电

解槽中的闭合回路由于某些因素而断开,整个系列形成断路就会导致断路口爆炸;而短路爆炸则是在正、负极母线短路的情况下,由于电压下降引起的打火爆炸。

引起火灾事故的危險源范围很广,铝电解车间的空气中铝粉尘的含量超标、整流柜元件的爆炸、高温铝水遇冷水、电源负荷过大、触电漏电等危險源都会导致电解车间的火灾爆炸事故。而且,在铝电解车间中,电解槽的温度总是保持在较高的水平,很容易发生爆炸。与其他事故相比较,火灾爆炸事故更容易发生,而且后果危害也更严重。

3 铝电解车间火灾爆炸事故树分析

3.1 事故树建立

事故树分析法(FTA)是一种逆时序分析方法,它以一种有向逻辑树的形式,从事件发生的开始,一步步深入分析其结果和原因,以期找出有效的措施,从而避免不可逆转的后果。通过逻辑推理来辨识和评估不同系统的危险性,不仅能分析出事故的直接原因,还能揭露出事故的潜在原因,为制定安全对策提供依据,以达到预防事故发生的目的^[8]。

本文运用事故树分析法建立铝电解车间发生火灾爆炸事故的事故树。事故树的基本事件类型见表1,火灾爆炸事故树分析如图2所示。

3.2 事故树分析

3.2.1 最小割集分析

最小割集是指能够导致顶上事件发生的最低限度的基本事件的集合。它表示系统的危险性,最小割集越多,系统越危险^[9]。本事故树可根据事故树

表1 电解车间火灾爆炸事故树基本事件类型

编号	事件名称	编号	事件名称
T	火灾爆炸	X_3	侧部炭块砌筑质量差
M_1	漏炉	X_4	阴极炭块破坏
M_2	短路口爆炸	X_5	阴极钢棒熔化
M_3	侧部漏炉	X_6	阴极炭块下内衬被侵蚀
M_4	底部漏炉	X_7	铝液流到炉底
M_5	断路	X_8	阴极软连接熔断
M_6	短路	X_9	电压监护不到位
M_7	槽壳的侧壁被烧穿	X_{10}	抬阳极过度
M_8	铝液从钢棒窗口流出	X_{11}	操控机失灵
M_9	炉底钢板被烧穿	X_{12}	槽子过冷,电解质下沉
M_{10}	阳极脱离电解质	X_{13}	顶紧气缸失效
M_{11}	阳极导杆与母线形成断路	X_{14}	焙烧槽软连接拆除过多
M_{12}	绝缘破坏	X_{15}	内在导电性能差
M_{13}	偏流熔断软连接	X_{16}	母线短路口处意外短接
X_1	炉帮破坏	X_{17}	异常高电压效应
X_2	炭糊扎固质量差	X_{18}	短路口温度升高

模型图以及布尔代数法求解,即 $T = M_1 + M_2 = M_3 + M_4 + M_5 + M_6 = X_1 + M_7 + M_8 + M_9 + X_8 + M_{10} + M_{11} + X_{16} + M_{12} = X_1 + X_2 X_3 + X_4 X_5 + X_6 X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} X_{15} + X_{16} + X_{17} X_{18}$, 最终得到最小割集有13个,见表2。

3.2.2 最小径集分析

最小径集是指保证顶上事件不发生的最低限度的基本事件集合。火灾爆炸事故分析最小径集共有31个,见表3。

3.2.3 结构重要度分析

结构重要度分析是指从事务树结构上分析基本事件的重要程度,采用最小割集和最小径集进行近似分析。第*i*个基本事件的结构重要度系数计

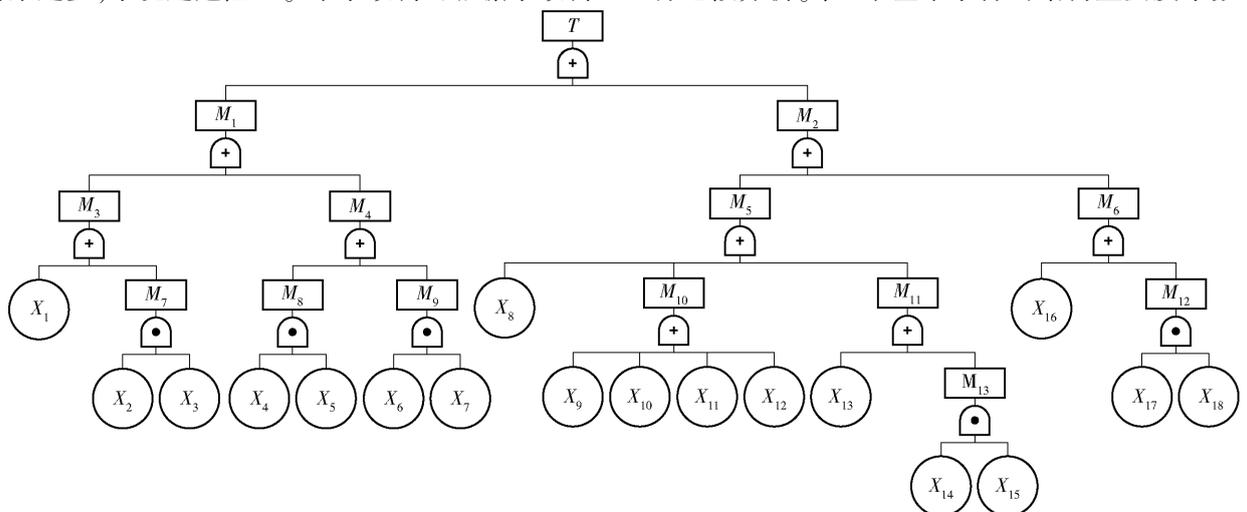


图2 铝电解车间火灾爆炸事故树分析

表 2 最小割集

序号	最小割集
1	$K_1 = \{X_1\}$
2	$K_2 = \{X_2, X_3\}$
3	$K_3 = \{X_4, X_5\}$
4	$K_4 = \{X_6, X_7\}$
5	$K_5 = \{X_8\}$
6	$K_6 = \{X_9\}$
7	$K_7 = \{X_{10}\}$
8	$K_8 = \{X_{11}\}$
9	$K_9 = \{X_{12}\}$
10	$K_{10} = \{X_{13}\}$
11	$K_{11} = \{X_{14}, X_{15}\}$
12	$K_{12} = \{X_{16}\}$
13	$K_{13} = \{X_{17}, X_{18}\}$

表 3 最小径集

序号	最小径集
1	$\{X_1, X_2, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}$
2	$\{X_1, X_2, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}\}$
3	$\{X_1, X_2, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{17}\}$
4	$\{X_1, X_2, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{18}\}$
5	$\{X_1, X_2, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}$
6	$\{X_1, X_2, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}\}$
7	$\{X_1, X_2, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{17}\}$
8	$\{X_1, X_2, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{18}\}$
9	$\{X_1, X_2, X_5, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}$
10	$\{X_1, X_2, X_5, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}\}$
11	$\{X_1, X_2, X_5, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{17}\}$
12	$\{X_1, X_2, X_5, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{18}\}$
13	$\{X_1, X_2, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}$
14	$\{X_1, X_2, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}\}$
15	$\{X_1, X_2, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{17}\}$
16	$\{X_1, X_2, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{18}\}$
17	$\{X_1, X_3, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}$
18	$\{X_1, X_3, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}\}$
19	$\{X_1, X_3, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{18}\}$
20	$\{X_1, X_3, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}$
21	$\{X_1, X_3, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}\}$
22	$\{X_1, X_3, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{17}\}$
23	$\{X_1, X_3, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{18}\}$
24	$\{X_1, X_3, X_5, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}$
25	$\{X_1, X_3, X_5, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}\}$
26	$\{X_1, X_3, X_5, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{17}\}$
27	$\{X_1, X_3, X_5, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{18}\}$
28	$\{X_1, X_3, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}\}$
29	$\{X_1, X_3, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}\}$
30	$\{X_1, X_3, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{17}\}$
31	$\{X_1, X_3, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}, X_{18}\}$

算见式(1)。

$$I_{\varphi}(i) = 1 - \prod_{x_i \in k_j} \left(1 - \frac{1}{2^{n_i} - 1}\right) \quad (1)$$

式中： x_i 为第*i*个基本事件； k_j 为第*j*个最小割集； n_i 为第*i*个基本事件所在*k_j*中各基本事件总数； $x_i \in k_j$ 表示第*i*个基本事件属于第*j*个最小割集。

$$I_{\varphi}(X_1) = 1 - \left(1 - \frac{1}{2^1 - 1}\right) = 1 \quad (2)$$

$$I_{\varphi}(X_{18}) = 1 - \left(1 - \frac{1}{2^2 - 1}\right) = \frac{1}{3} \quad (3)$$

根据上述分析， $I_{\varphi}(X_{16})$ 、 $I_{\varphi}(X_{13})$ 、 $I_{\varphi}(X_{12})$ 、 $I_{\varphi}(X_{11})$ 、 $I_{\varphi}(X_{10})$ 、 $I_{\varphi}(X_9)$ 、 $I_{\varphi}(X_8)$ 的结构重要度同 $I_{\varphi}(X_1)$ 一致， $I_{\varphi}(X_{17})$ 、 $I_{\varphi}(X_{15})$ 、 $I_{\varphi}(X_{14})$ 、 $I_{\varphi}(X_7)$ 、 $I_{\varphi}(X_6)$ 、 $I_{\varphi}(X_5)$ 、 $I_{\varphi}(X_4)$ 、 $I_{\varphi}(X_3)$ 、 $I_{\varphi}(X_2)$ 的结构重要度与 $I_{\varphi}(X_{18})$ 一致。

计算所得各基本事件的结构重要度系数见表4。

表 4 基本事件的结构重要度系数

事件	结构重要度系数	事件	结构重要度系数
$I_{\varphi}(X_1)$	1	$I_{\varphi}(X_{10})$	1
$I_{\varphi}(X_2)$	1/3	$I_{\varphi}(X_{11})$	1
$I_{\varphi}(X_3)$	1/3	$I_{\varphi}(X_{12})$	1
$I_{\varphi}(X_4)$	1/3	$I_{\varphi}(X_{13})$	1
$I_{\varphi}(X_5)$	1/3	$I_{\varphi}(X_{14})$	1/3
$I_{\varphi}(X_6)$	1/3	$I_{\varphi}(X_{15})$	1/3
$I_{\varphi}(X_7)$	1/3	$I_{\varphi}(X_{16})$	1
$I_{\varphi}(X_8)$	1	$I_{\varphi}(X_{17})$	1/3
$I_{\varphi}(X_9)$	1	$I_{\varphi}(X_{18})$	1/3

因此，对结构重要度系数排序如下：

$$[I_{\varphi}(X_{16}) = I_{\varphi}(X_{13}) = I_{\varphi}(X_{12}) = I_{\varphi}(X_{11}) = I_{\varphi}(X_{10}) = I_{\varphi}(X_9) = I_{\varphi}(X_8) = I_{\varphi}(X_1)] > [I_{\varphi}(X_{18}) = I_{\varphi}(X_{17}) = I_{\varphi}(X_{15}) = I_{\varphi}(X_{14}) = I_{\varphi}(X_7) = I_{\varphi}(X_6) = I_{\varphi}(X_5) = I_{\varphi}(X_4) = I_{\varphi}(X_3) = I_{\varphi}(X_2)]$$

3.3 结果分析

通过对铝电解车间火灾爆炸事故进行事故树绘制可以发现，影响事故树的基本事件一共有 18 个。根据上述的计算可知，一共有 13 个最小割集，31 个最小径集。其中炉帮破坏、阴极软连接熔断、电压监护不到位、抬阳极过度、操控机失灵、电解质下沉、顶紧气缸失效以及母线短路口处意外短接这几个基本事件对火灾事故的发生影响最大。

4 火灾爆炸事故的预防措施

4.1 工艺技术改进

在生产过程中，铝电解槽工艺的技术条件包括电解质温度、铝液面水平、电解质水平及分子比等，在生产过程中总是在动态变化，其变化主要是由下

料过量(欠量)、人工操作不稳定、阳极效应或者系列电流波动引起的。为保持工艺技术条件稳定,控制措施可分为以下两个部分:

1)人工控制。为了检查工艺技术条件的稳定性,有必要对各项参数进行准确测量,通过铝电解槽控制系统对这些数据进行比较和分析,预测铝电解槽性能的变化;并采取适当的措施防止导致火灾爆炸事故的基本原因事件发生。应每周对电解质分子比进行一次全样分析,若条件允许还可以对电解质的初晶温度进行抽样分析,以便通过数据分析总结电解质过热程度的变化^[10]。每周测量一次炉底压降,以便于及时掌握炉底变化情况,从而及时消除炉帮破坏、槽子过冷导致的电解质下沉、抬阳极过度等事故隐患。定期对顶紧气缸内部及其附件、顶紧气缸传感器进行检查,若发生故障及时更换,以此避免顶紧气缸失效而发生事故。此外,应严格执行短路口绝缘检查和过道母线的位移、绝缘检查的制度,对抬母线的过程也严格管理,从而保障焙烧启动期间的安全操作,防止母线短路口处意外短接。

2)机器控制。对铝电解过程中的槽电压、电解质温度、铝水平、电解质水平及分子比等重要参数,还可通过仪表加以监测预警,当参数发生异常时,可在第一时间终止电解,用自动化联锁控制代替人为操作,以降低和控制风险^[11]。同时,对于铝电解槽还可设置网络化的铝电解智能化语音报警系统,一旦发生异常,报警系统会立刻发出信号到远程控制计算机上,以便立即采取措施处理^[12],避免出现电压监护不到位、操控机失灵等问题,以及在温度异常时及时采取措施避免阴极软连接熔断。监测预警和联锁装置应按照有关标准安装,一旦发生漏炉,装置就会立即响应处置并自动处置,避免火灾事故的发生。

4.2 安全管理改进

1)建立由上至下的干部安全责任制。在提高效益的同时,认真贯彻“预防为主、防消结合”的消防工作方针,落实“谁主管、谁负责”的原则,结合企业实际,成立以主管厂长负责的防火安全委员会,坚决实施各级领导干部安全责任制。从上到下形成一个“层层抓,人人管”的逐级防火网。

2)定期安全检查,进行安全教育和技术培训。防火安全委员应定期会同工程技术人员、安环处、保卫处的有关人员,对全厂的物资仓库、油库、微机站、电气焊等重点要害部位和工种进行防火安全检查,

并对职工定期进行安全教育和培训。对新职工及转岗人员进行岗前三级安全教育,提高职工的安全防范意识。

3)建立健全防火制度,设置企业消防队。针对企业生产实际,建立全面的防火制度,制定《全厂消防工作管理制度》《消防器材管理规定》等种防火岗位责任制,同时把安全工作作为评优评先的先决条件。设置专业的企业消防队,按照灭火作战计划经常开展消防业务技能训练活动和灭火演练,提高消防员的灭火作战能力,关键时刻发挥重要作用。

4)建立事故预防机制。通过调查分析灾爆炸事故的后果以及企业处置事故的应急能力,预先制定相关的应急救援行动计划和方案,将事故灾害在最短时间内尽可能控制到最小范围。同时,应针对某些对企业安全生产有较大影响的危险源和隐患,制定相关的应急措施或方案,做到有备无患。

5)定期组织开展应急演练,如漏炉事故演练、短路口爆炸事故演练等;总结和评估每次应急演练的效果,及时完善应急救援预案;电解铝生产车间与供电系统车间采取联动应急信号,生产车间一旦发生紧急情况,供电车间即刻接收信号并切断电源,从而确保系列生产安全。

6)实行铝电解槽标准化管理。在铝电解法生产过程中,除了需要较高的工艺水平外,还需要严格规范的管理模式。要有效控制和管理铝电解槽的电压、槽温度、两水平、分子比等因素,使铝电解槽的技术参数保持在最佳的均衡水平;必须制定标准,严格按照标准进行生产,确保铝电解槽的平稳运行。

5 结束语

通过事故树分析法分析铝厂电解车间火灾产生原因以及整个系统的薄弱环节,对于提高厂区可靠性、避免火灾事故发生具有重要意义。针对可能发生的火灾事故原因提出相应的管理措施和预防措施,能够有效减少火灾爆炸事故的发生,为铝电解厂在消防方面的设计及运行管理提供了参考。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 王忠亮,苏义鹏. 铝电解车间工艺管理创新与实践[J]. 中国金属通报,2022(5):21 - 23.
- [5] 赵成. 电解铝生产工艺的优化研究[J]. 现代盐化工, 2022,49(6):46 - 48.
- [6] MARMO L, PICCININI N, DANZI E, et al. Small magnitude explosion of aluminium powder in an abatement plant: a telling case[J]. Process Safety and Environmental Protection,2015,98:221 - 230.
- [7] 高文义. 浅谈铝行业安全事故的成因、特点及预防[J]. 有色冶金节能,2007(6):31 - 33.
- [8] 赵静,张福群. 基于事故树分析的化工实验室火灾爆炸危险性研究[J]. 辽宁化工,2018,47(5):453 - 455, 458.
- [9] 周洪文,冯鑫淼. 基于事故树的施工伤亡事故分析[J]. 江西建材,2022(2):235 - 236,239.
- [10] 高连山. 工艺技术条件和阳极更换对预焙铝电解槽槽电压的影响及防治措施[J]. 有色冶金节能,2013, 29(3):19 - 21.
- [11] 新京报. 铝水爆炸事故致5死,专家:监测报警和自动联锁装置十分必要[S]. (2022 - 04 - 23). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1730903776342436462&wfr=spider&for=pc>.
- [12] 赵西顺. 网络化铝电解语音报警系统的设计与实现[J]. 青海科技,2006(5):50 - 51.

Analysis of Fire and Explosion Accidents in Aluminum Electrolysis Workshop Based on Accident Tree

QUAN Pengchen¹, ZHU Miao², CUI Genqun¹, LI Yihui², XIANG Yu³, CAO Wenqi¹, XU Hengquan¹, ZUO Yuhai⁴, HAO Lin¹, LI Gang¹, LIU Mingchuan¹, LIAN Pin¹, QIAN Zhongyou², TANG Mi⁵, YIN Gang²

(1. A'ba Aluminium Plant, Wenchuan 623001, China;

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

3. Army Engineering University Communication Non Commissioned Officer School, Chongqing 400035, China;

4. Qinghai Haiyuan Green Wheel Manufacturing Co., Ltd., Qinghai 810000, China;

5. Zhongxi Green Carbon (Chongqing) Technology Co., Ltd., Chongqing 400042, China)

Abstract: In this paper, the hazard sources of fire and explosion in the electrolysis workshop of an aluminum plant were identified, and the possible causes of fire and explosion accidents in the electrolysis workshop was found out by building a complete accident tree. Taking the fire accident as the top event, by analyzing the minimum cut set, the minimum path set, and the structural importance ranking of each basic event, It was found that the basic events such as furnace gang destruction, voltage supervision not in place, accidental shorting at the busbar short intersection, and so on have a greater impact on the top event. For the reasons that may lead to accidents, improvement measures were proposed from the aspects of process technology and safety management, respectively. In terms of process technology, it was recommended to strengthen the maintenance and inspection of the furnace gang, strengthen the monitoring of cathode soft connection, and strengthen the setting and maintenance of voltage monitoring system, etc. In terms of safety management, it was recommended to strengthen the staff's safety training and education, establish a perfect safety management system and operating procedures, and strengthen the regular inspection and maintenance of equipment, etc., in order to effectively prevent the occurrence of fire and explosion accidents in aluminum electrolysis plants.

Key words: aluminum electrolysis; accident tree analysis; hazards sources; process technology; safety management