

## 基于故障树分析的冶金设备检修维保风险识别

王志锋

中冶宝钢技术服务有限公司, 上海 201900

[摘要]冶金设备检修维保环节存在高温、高压、复杂机械等高风险因素,传统的风险管理方法无法全面识别潜在风险。文中采用故障树分析法,搭建以“冶金设备检修维保事故”为顶事件的故障树模型。通过全面排查引发事故的各类直接和间接因素,找出关键风险路径和薄弱环节。该方法能清晰展现设备故障、人为失误、管理缺陷等多类风险源的耦合关联,为冶金企业打造针对性维保方案、优化安全管理效能提供科学参照。

[关键词]故障树分析;冶金设备;检修维保;风险识别;安全管理

DOI: 10.33142/ec.v8i12.18769

中图分类号: TF57

文献标识码: A

### Risk Identification of Metallurgical Equipment Maintenance and Repair Based on Fault Tree Analysis

WANG Zhifeng

MCC Baosteel Technology Service Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

**Abstract:** There are high-risk factors such as high temperature, high pressure, and complex machinery in the maintenance and repair of metallurgical equipment, and traditional risk management methods cannot fully identify potential risks. The fault tree analysis method is used in the article to build a fault tree model with "metallurgical equipment maintenance accidents" as the top event. By comprehensively investigating various direct and indirect factors that caused accidents, identify key risk paths and weak links. This method can clearly demonstrate the coupling relationship between multiple risk sources such as equipment failure, human error, and management defects, providing scientific reference for metallurgical enterprises to create targeted maintenance plans and optimize safety management efficiency.

**Keywords:** fault tree analysis; metallurgical equipment; maintenance and upkeep; risk identification; safety management

#### 引言

冶金行业是国民经济的基础支撑产业,其生产设备具备大型化、连续化、自动化及工况苛刻等特点。设备检修维保是保障生产安全稳定运行的关键环节,该作业过程环境复杂、工序交叉、危险源集中,传统风险识别方法常聚焦局部或表面,未对风险事件的逻辑关联和演变路径展开系统分析。故障树分析属于自上而下的演绎型分析方法,可从既定顶事件开展,按层级追查所有可疑的原因事件,直观呈现故障逻辑,适配复杂系统风险溯源工作。本文把故障树分析法用在冶金设备检修维保的风险识别里,要搭建结构化的风险分析模型,为风险系统性防控提供理论支撑和实践指引。

#### 1 冶金设备检修维保风险故障树模型的构建

##### 1.1 确定顶事件与边界条件

开展故障树分析的第一步是明确界定分析的“靶心”,

即顶事件。为了保证分析的实效性,顶事件要锁定冶金设备检修维保阶段最不易出现、后果最严重的事事故类型,典型定义为“冶金设备检修维保时段发生重大安全或生产事故”。该项事件能进一步拆分,诸如“人员伤亡”“设备严重损毁”“重大生产中断”。必须清晰界定分析的时空和管理边界,要覆盖检修计划、停机准备、作业实施、试车恢复全流程的时间区间;需明确空间范围覆盖的工艺单元和设备;系统必须纳入参与该过程的所有人员角色、涉及的能源介质(煤气、氧气、电力、液压)、工器具以及相关作业许可和管理制度,精准划定边界是阻止分析范围无限延伸或核心要素遗漏的前提<sup>[1]</sup>。

##### 1.2 识别中间事件与逻辑门

搭建故障树的核心是从顶事件起步,采用逻辑演绎法,分层分析造成该事件的直接、必要且充分的原因,即中间事件。完成这一步要统筹各类信息:深挖行业和本单位过

往事故案例报告, 排查直接诱因; 逐项拆解标准检修作业流程, 定位流程中断或失效的关键节点; 全面访谈经验丰富的技术专家、安全管理人员及一线作业人员, 提取隐性知识和常见失效模式。做完上述工作, 能找出“设备检修期间非预期启动”“危险能量(电、机械能、势能、化学能)意外释放”“作业人员暴露在未受控危险环境(如中毒、窒息、高处坠落、物体打击)”等, 作为直接触发顶事件的中间事件。

在明确中间事件后, 必须依据事件间的因果关联, 用标准逻辑门连接, 搭建故障树的逻辑结构。应用最广泛的是“与门”和“或门”。“与门”的定义是只有其连接的全部输入事件同步触发, 输出事件(上级事件)才会启动, 这一般表示多重防护措施同时失效。例如, 设备异常启动这一中间事件, 需要“主控室误操作”和“本地紧急停止按钮失效”两个事件同时出现。“或门”说明下方连接的任意输入事件触发, 就会引发输出事件, 代表了单点故障即可诱发事故的薄弱部位。例如, “能量意外释放”的诱因, 可能是“挂牌上锁程序执行错误”“盲板抽堵不彻底”“能源介质阀门内漏”中的任意一个, 正确运用逻辑门是保证故障树逻辑严密、能实施定量或定性分析的基础。

### 1.3 展开至基本事件

故障树分析的核心目的, 是把顶事件逐步拆解到最基础、不用或不能再拆解的底层原因, 也就是基本事件。这些基本事件构成系统失效的“基因”, 也是风险防控措施可直接施加作用的最小单元, 从每个中间事件切入, 需反复追问“这个事件为何发生”, 一直定位到具体、可管控的失效点。分解流程需依照“人、机、环、管”系统思维框架<sup>[2]</sup>。

最终形成的基本事件库, 包含具体细微的失效形态。在“人”的方面, 可能包括: 检修人员违规未穿戴绝缘鞋或安全带、监护人员脱岗或注意力不集中、作业前安全交底无实效, 员工未认知风险。在“机”的方面, 可能包括: 旋转设备安全防护罩拆除后未及时复位、压力表或气体检测仪定期校验超期、液压系统软管存在老化裂纹。在“环”的方面, 可能包括: 有限空间通风不佳引发有毒气体聚集、检修平台光照不足或地面油污湿滑, 可能包括: “高处作业许可证审批把关松懈”“检修方案风险辨识有疏漏或安全措施缺失”“交叉作业协调沟通机制失效”。用逻辑门组合这些基本事件, 最终触发顶事件产生, 精准呈现出事故各类潜在的发生路径, 为制定精准、系统性的预防措施提供完整的“故障地图”。

## 2 基于故障树的检修维保风险识别与分析

### 2.1 关键风险路径的追溯与辨识

故障树定性分析靠全面梳理逻辑结构, 可排查出所有引发顶事件的基本事件最小组合, 也就是最小割集。每个最小割集对应一条单独且完整的风险传递路径, 能够清楚地呈现事故的演变递进链条。例如, 在典型场景中, “安全警示标识不清”或“人员未经许可进入危险区域”两个基本事件, 通过“或门”触发“人员处于危险位置”中间事件; 用这个中间事件结合“设备意外能量释放”, 依靠“与门”运行, 最终引发事故顶事件。辨识这些关键路径, 还完整呈现风险从初始隐患逐步传递、叠加最终导致系统失效的全流程, 也找准了事故链的关键环节。依托这些路径, 管理者能针对风险传递的关键节点, 采取阻断手段, 譬如优化警示标识管理、严管区域准入资格, 切实斩断事故链, 提升系统整体安全水平<sup>[3]</sup>。

### 2.2 基本事件重要度与薄弱环节评估

在定性分析明确最小割集后, 可再结合历史数据或专家经验, 通过定量或半定量方法算出各基本事件的概率重要度、结构重要度等指标。这些指标可客观体现不同基本事件对顶事件发生的作用大小, 协助找出系统关键薄弱点。相关分析可以证明“能源隔离程序执行不严格”的重要性远超部分具体工具缺陷, 表明管理流程疏漏对事故的影响远超个别设备故障。按照重要度评估成果, 管理者可科学规划风险管控的先后次序, 把有限资源聚焦到改进最关键、影响最大的环节。这种通过数据支撑的决策模式, 同时提升了安全措施的有效性及针对性, 也调整了资源配置, 增强了风险防控的效费比与系统可靠性。

### 2.3 风险耦合机制的揭示

故障树模型借逻辑门连接不同事件, 直观呈现设备、人因、管理及环境等多类风险因素的内部联系与耦合作用。冶金设备检修事故极少由单个因素引发, 大多由多种风险要素互相作用、共同催生, 管理监督有疏漏易引发作业许可走流程, 进而造成“个体技能不足”和“设备固有风险”在无管控措施时重合, 通过“与门”等逻辑关系引发严重事故。该类分析充分暴露了风险生成和演化的系统性和复杂性, 明确各类风险并非单独出现, 却在特定条件下相互提振、汇成合力。因此, 安全治理需要跳出局部整改, 围绕系统整体实施综合干预, 统筹人、机、管、环各项措施, 阻断风险耦合机制提升整体安全水平。

### 3 故障树分析结果在风险管控中的应用

#### 3.1 优化检修维保规程与方案

故障树分析(FTA)的核心目标之一,重点是把抽象的顶层失效事件,调整为对底层具体可操作的控制措施。基于分析锁定的关键基础事件,需系统性复核现有检修维保规程、安全作业标准,完成靶向修订。这代表检修规程优化绝非空话套话,而是直接对准经定量或定性分析验证对系统可靠性影响最大的薄弱环节。例如,对于“能量隔离”的高频基础事件集合,修订后的规程需明确规定,隔离点必须使用个人专用锁具,落实双人确认和挂牌制度。在作业开始前,借助“尝试启动”等实际验证步骤确认隔离有效性,把原则性要求变成必须执行的硬性操作步骤<sup>[4]</sup>。

通过“与门”“或门”逻辑关联多个基本事件形成的特定风险路径,优化规程需瞄准切断或弱化这条路径。以交叉作业风险为例,若故障树标明“上方动火作业”和“下方易燃物未清理”同步发生会诱发火灾的链路。修订方案需要分别制定动火许可和场地清理要求,必须额外在工序安排中强制明确时间或空间的硬性隔离措施,比如要求下方区域作业务必在动火作业启动前完成并撤离,或加装实体隔板。通过这种途径,让安全规程脱离孤立条款的组合,搭建互相关联、主动拦截风险传导网络的操作规范,大幅增强其针对性和有效性。

#### 3.2 强化关键环节的风险预警与防控

故障树的重要度分析(如概率重要度、关键重要度)能给风险管理资源的高效配置提供科学决策依据。参照分析结果,要把有限的监控和防控资源优先投给对顶上事件发生概率贡献最大的基本事件和风险路径。针对识别出的高风险事件,诸如“作业人员未经许可进入危险区域”“安全连锁被跳过”,要设立超出常规检查的强化管控机制。涉及但不只限于:强化物理准入把关,通过人脸识别或门禁刷卡系统实时校验人员资质与权限;在高危作业区域布设智能视频分析系统,自动识别未佩戴个人防护装备、监护人员缺位等违规行为并马上告警;实时监测关键安全连锁状态,所有旁路操作必须触发管理层审批流程和实时报警。

这类依托重要度制定的防控策略,从根本上是主动出击且提前设防的。它打破了传统安全管理里平均投入资源或事后被动应对的模式,转向对“少数关键”风险点精准布控。例如,针对“特种设备带病运行”这一高风险基础事件,防控措施可融合物联网技术,当设备关键参数(如振动、温度)超出阈值,自动预警并限制启动操作,而非

单靠定期点检。对于人为因素主导的高风险路径,诸如“培训不足→误操作→设备损坏”,可依靠在操作界面设置强制确认提示、实施模拟操作培训考核、建立行为观察反馈计划推行系统性干预。通过把技术监控与管理流程安插到高风险环节,实现从被动应对到实时预警和即时干预的转变,努力把风险消灭在萌芽阶段<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 指导应急预案编制与安全培训

故障树通过清晰的逻辑图形,直观说明顶上事件(事故)通过所有可行组合变为现实事件的逻辑。该特质可作为编制应急预案和开展安全培训的优质工具。在编制应急预案环节,传统做法可能依据宽泛归类的事故类型设定响应流程,以故障树为基础的应急预案,更具针对性与逻辑性。编制人员可从故障树内挑选某个中间事件或基本事件作为初始场景,再沿着逻辑门反向排查可能造成的更严重事件,反向排查所有引发该事件的潜在原因。按此制定的应急处置方案,不仅明确了不同事故发展阶段应采取的具体技术措施,还明确了需要同步排查的潜在关联故障点,让应急响应成为目标明确、步骤清晰的系统化行动,而非混乱无序的莽撞回应。

在安全培训的范围中,故障树分析产出是价值极高的警示教育素材。将本企业或行业内的典型故障树,尤其是那些由常见人为失误、管理漏洞形成的风险链路,转为培训案例,可直观呈现给从业人员:一处细微疏漏,怎样依托整套连锁反应,最终或引发重大事故的。这类培训打破了仅罗列安全条款的套路,它梳理事故背后的逻辑线索,引导员工充分认知“这些规定为何要遵守”,进而增强它的风险感知能力和情景意识。培训以故障树为核心开展小组讨论,引导员工自主梳理风险阻断路径。此举可加固记忆,更能唤起员工主动参与安全管理的动力,从“要我安全”转为“我要安全”“我懂安全”,最终全面增强组织的风险预判与整体防御能力。

### 4 结语

本文全面讲解把故障树分析法用到冶金设备检修维保风险识别的流程。通过构建逻辑缜密的故障树模型,能从上至下、逐层剖析,辨别出管理疏漏到具体操作偏差、设备潜在问题到环境不良的各类风险因素及它们复杂的关联关系,排查关键风险路径和薄弱环节。该方法打破传统经验判断的局限,提升风险识别的系统性与预见性。依据分析结论,企业可更科学优化维保规程、聚焦防控重点、健全应急预案与培训体系,大幅强化冶金设备检修维保的本质安全能力。在未来,可进一步结合大数据、传感器技

术,实时调整基本事件概率,精准管控风险动态评估风险。

[参考文献]

[1]谢宗宸,朱鹏.基于故障树的电力变压器维修技术研究[J].家电维修,2025(12):137-139.

[2]黎敏谦,陈林,杨峰.基于故障树分析法的跟踪不稳定故障诊断研究[J].设备管理与维修,2025(15):177-181.

[3]王绍成.冶金设备管理与维修出现的问题与对策[J].冶金与材料,2024,44(5):157-159.

[4]郭韡,俞洪杰,马续创,等.检修规范化在冶金设备维护中的应用[J].山西冶金,2021,44(5):284-286.

[5]肖国亮,黄建新.状态检测故障诊断技术在冶金设备中的应用[J].中国设备工程,2018(22):111-112.

作者简介:王志锋(1989—),男,毕业于西安建筑科技大学华清学院;机械设计制造及其自动化,当前就职于中冶宝钢技术服务有限公司,职务:中冶宝钢第三分公司印尼项目部副经理,职称级别:工程师。