

doi: 10.7690/bgzdh.2025.03.017

HAZOP 方法在含铝炸药混合工序风险评估中的应用

尚凤琴¹, 陈明磊^{1,2}, 何丹¹, 王静¹, 阮健¹, 金国良¹

(1. 甘肃银光化学工业集团有限公司, 甘肃 白银 730900; 2. 北京理工大学材料学院, 北京 100081)

摘要: 针对制备含铝炸药的混合工序安全风险高的问题, 提出采用危险可操作性分析(hazard and operability, HAZOP)评价方法。结合混合工序中的工艺装置, 系统表达 HAZOP 实际工作过程与使用的方法, 并评估不同偏差引起的后果, 提出相应的改进措施, 降低风险等级。结果表明, 该方法可为其他同类型含铝粉的混合工序提供参考。

关键词: 铝粉; 炸药; 混合工序; HAZOP

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Application of HAZOP Method in Risk Assessment of Aluminized Explosive Mixing Process

Shang Fengqin¹, Chen Minglei^{1,2}, He Dan¹, Wang Jing¹, Ruan Jian¹, Jin Guoliang¹

(1. Gansu Yinguang Chemical Industry Group Co., Ltd., Baiyin 730900, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In view of the high safety risk in the mixing process of preparing aluminized explosives, the hazard and operability (HAZOP) evaluation method was adopted. Combined with the process unit in the mixing process, system express the actual working process and the method used of HAZOP, and the consequences caused by different deviations were evaluated, and the corresponding improvement measures were put forward to reduce the risk level. The results show that this method can provide a reference for other mixing processes of the same type of aluminum-containing powder.

Keywords: aluminum powder; explosive; mixing process; HAZOP

0 引言

含铝炸药属于混合炸药的一种。由于铝粉的加入, 使其相比普通单质炸药具有更高的爆热、爆温与独特的爆轰特性^[1]。由于铝粉本身固有危险特性, 如在水蒸气含量较高的环境能自燃^[2], 与氧化剂、氯、氟、酸类、强碱等物质接触也可能燃烧爆炸等, 故在生产、储运和使用中, 含铝炸药发生事故的风险比常规炸药高出一个数量级^[2-4], 而关键的混合制备工序则更需要严格的安全规程, 但此工序却常因其操作简单而忽略其危险性。大量的事故案例表明, 发生事故与操作人员对混合工序危险性认识不足、安全意识缺乏有直接关系。加强对操作人员的安全教育和规范操作能有效防范事故的发生, 但同时也应对各类危险隐患实行有效的危险性识别和评价方法^[5-6]。

针对火炸药生产企业较少使用危险可操作性分析(HAZOP)的现状, 笔者将其引入到含铝炸药混合工序中, 通过对含铝混合炸药混合工序的安全分析, 识别出潜在风险, 并给出整改建议和措施。

1 含铝炸药混合工序简介

目前, 含铝炸药的混合工序多采用机械混合法, 作业区主要使用的设备有混合机、湿式除尘器等, 此工序中将筛选工序运送的炸药 PBX 半成品与铝粉进行均匀混合, 随后进入下一步的包装工序, 即成为最终运输的成品。

混合工序为制备含铝炸药的关键工序, 混合的均匀性直接影响炸药成品的外在质量(外观)和内在质量(组分均匀性)。混合不均匀的物料可能会引起粒度分布不均、颜色不均、药量不均从而影响产品性能。

2 含铝炸药混合工序 HAZOP 分析

HAZOP 适用于含铝炸药混合工序的不同阶段, 需要分析每步操作及每个参数偏差可能产生的影响, 同时也需要针对相应的后果设计对应的安全措施。

2.1 准备工作

开展此次 HAZOP 分析前, 需要首先由专门负

责评估分析此混合工序的部门专家组成分析小组，并明确分析目的、对象和范围。分析小组成员一般为 5~7 人，一般包括组长、秘书和此工序的主要负责工艺、设备、仪表、自控、安全和一线操作人员等。HAZOP 分析小组的成员构成及对此混合工序的危险性认知水平很大程度上决定此次 HAZOP 分析的质量^[7-8]。

在开展 HAZOP 分析前应收集与含铝炸药混合工序相关的各项详细资料，包括操作规程、设备和仪表的流程图、设备布置图、施工图纸、仪表规格书和仪表连锁逻辑图等，还应收集之前此工序或相似工序的事故资料统计，作为重要的借鉴^[9]。

2.2 根据操作规程进行分析

含铝炸药混合工序的 HAZOP 分析与传统的化工生产过程的 HAZOP 分析不同，其所涉及的工艺参数较少，主要为混合温度、混合时间、转速、投料量和投料配比等，但上述参数的变化均会产生严重的偏差，所以应针对相应的操作步骤进行分析。

笔者应用本方法对产品混合工序的危险进行分析，混合工序中主要的操作步骤为：启动除尘系统；铝粉称量；加 PBX 炸药半成品；加铝粉；

升温、混合；放料；降温；出料。随即进入下一步的包装工序。

HAZOP 分析的具体过程如下：

1) 选取节点。

笔者把混合机、湿式除尘器及其物料和压空等进出管线划分为一个节点。

2) 熟悉工艺流程和操作步骤。

组长和工艺专家等对此混合工序的各关键工艺参数，如混合温度、混合时间、转速、出料温度、投料量、混入杂质等进行讲解，确保小组成员熟悉。

3) 确定偏差等级。

根据引导词和具体的设备，对每类偏差进行分级处理，确定出重点分析的偏差。对于风险很低的偏差选择忽略，重点分析危险性较大的偏差。

4) 对偏差进行 HAZOP 分析。

分析小组成员对每个工艺参数进行分析，得到偏差产生的原因、可能的后果、建议的安全措施等。小组秘书负责整理记录，最终归纳总结，并经过小组通过。表 1 为偏差后果的严重程度、偏差发生可能性、对应的风险划分和风险等级划分标准。

表 1 后果、可能性、严重性、风险矩阵对应图

严重性	后果				可能性（概率）					风险	说明
	人员	资产	环境	企业声誉	1	2	3	4	5		
					行业内从未发生 (10-6~10-7)	行业内时有发生 (10-5~10-6)	本工厂有发生 (10-4~10-5)	本工厂年内发生多次 (10-4~10-4)	本工厂同一地点多次发生 (10-2~10-3)		
A	无伤害	无损失	无影响	无损失						无	不需采取行动
B	轻微伤	轻微损失	轻微影响	轻微损失						低	选择性的采取行动(评估可选择的方案)
C	轻伤	局部小损失	轻微影响	有限损失						中	选择适合行动(通知企业管理部门)
D	重伤	局部损失	局部影响	严重损失						高	立即采取行动(通知企业管理部门)
E	一人死亡	重大损失	重大影响	国内影响							
F	多人致死	严重损失	严重影响	国际影响							

3 含铝炸药混合工序 HAZOP 分析结果

笔者对含铝 PBX 炸药混合工序中生产装置危险性最大的混合机进行 HAZOP 分析，列出节点分析需要的引导词和工艺参数，此节点分析的部分偏差和分析结果如表 2 所示。表 2 中严重性、可能性和风险根据表 1 所示内容判别。

从表 2 可以看出：混合温度和出料温度过高、混合时间过长、转速过快、混入杂质和步骤执行不足等偏差需要引起操作人员的重视。如当混合和出料温度过高时，应立即关闭蒸汽阀、热水出口阀和

热水进口阀，等待降温至正常温度方可继续操作。

值得注意的是，其他异常情况，如混合工序中突然停电、停压空和停水等，应立即停止搅拌及加热，关闭热水的进、出阀门，关闭热混机和除尘器，待恢复正常后方可正常操作。

针对以上对含铝混合炸药混合工序的 HAZOP 分析，提出以下措施：

1) 混合机的自控操作时，应启动“桨叶下降”，使桨叶下降与混合机对接好；设定混合机温度高限报警值，设定工艺参数，打开热水进水阀和

热水回水阀，预热混合机。

按钮，自控室在紧急情况下可将混合工序紧急停车，避免意外的发生。

2) 对混合温度和出料温度过高等可设置急停

表 2 含铝炸药混合工序的部分 HAZOP 分析结果

偏差	偏差描述	原因	后果	风险矩阵			建议安全措施
				严重性	可能性	风险	
温度/℃	混合温度过低<70	热水机组进口阀或电源未开；加热水温度过低；热水机组内加热器失效；温度计失效或损坏	产品组分不合格，铝粉包覆混合不均匀，混合时间延长	B	3	低	检查热水机组各个阀门、电源闭合状态；检查热水储槽加热状态；检查、校验或更换加热器或温度计
	混合温度过高>90	加热水温度过高；热水储槽内加热器失效；温度计失效或损坏	存在安全隐患发生爆炸	E	2	高	检查热水储槽加热状态；检查、校验、更换加热器或温度计
	出料温度过高>35	热水储槽内加热器失效；温度计失效或损坏；热水流量过大；操作失误	存在安全隐患发生爆炸	D	3	高	检查热水储槽加热状态，检查、校验、更换加热器或温度计；正确设置参数，加强视频监控，严格按照工艺操作
时间/min	混合时间过短<25	操作失误；混合机控制、报警、动力系统故障	铝粉包覆混合不均匀；产品组分不合格；延长干燥时间，甚至成品湿度达不到规定要求	B	4	低	检查混合机控制系统工作状态；检查气动泵工作状态；正确设置混合时间，加强视频监控，严格按照工艺操作
	混合时间过长>50	操作失误；混合机控制、报警、动力系统故障	存在安全隐患，发生爆炸	D	3	高	检查混合机控制系统工作状态；正确设置混合时间，加强视频监控，严格按照工艺操作
转速/(r/min)	转速过低<15	混合机设备故障；压空压力不足	铝粉包覆混合不均匀；产品组分不合格；延长干燥时间，甚至成品湿度达不到规定要求	B	3	低	检查混合机工作状态；检查压空系统是否正常
	转速过高>60	混合机设备故障；压空压力过高	存在安全隐患，发生爆炸	D	4	高	检查混合机工作状态；检查压空系统是否正常
配比异常	投料配比不合格	操作失误；设计失误	物料混合不均匀；产品组分不合格	B	3	低	两人称量，一人称量后，一人复称；每次按照操作法投料，加强视频监控，严格按照工艺操作
污染杂质	铝粉混入杂质	原材料或生产工序中出现杂质；托盘使用前未清理，存在杂质	影响成品的纯度；杂质形成热点，易燃易爆	D	4	高	注意原材料纯度和生产单元的工艺控制；加强防尘措施，员工穿戴防尘服装，托盘使用前清理干净
步骤执行不足	步骤执行不足	操作失误	影响产品质量，引发设备故障，甚至发生爆炸	D	4	高	加强岗前培训和交接班管理；规范操作，加强视频监控

4 结论

笔者的研究结果表明：HAZOP 分析方法应用于含铝混合炸药混合工序的安全分析是可行的，能够有效地识别出此工序中潜在的危险有害因素，而且可针对性地提出控制或减小风险的措施，确保此高危工序安全、平稳地运行，同时对铝粉混合推进剂和发射药等其他含能产品混合工序的安全管理具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 周珏斐. 包覆型及非包覆型铝粉的危险性分类研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(17): 12-14.

[2] 赵颐晴, 郑华, 蔡晓峰, 等. 铝粉遇水放气危险性研究[J]. 职业卫生与应急救援, 2016, 34(1): 79-81.

[3] 王以革. 铝粉爆炸特性与涉铝粉场所防爆对策探讨[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(6): 850-852.

[4] 魏吴晋. 铝纳米粉尘爆炸及其抑制技术研究[D]. 徐州：中国矿业大学, 2010.

[5] 张超, 严铁军. HAZOP 分析方法在武钢焦化三回收作业区生产中的应用[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(4): 74-77.

[6] 陈明磊, 尚凤琴, 秦亮, 等. HAZOP 分析在 RDX 硝化反应的应用与研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(12): 46-49.

[7] 陈明磊, 秦亮, 杨学斌, 等. 基于 HAZOP 的 RDX 氧化结晶工序风险分析[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(12): 11-13.

[8] 付建民, 郑晓云. 井控作业危险性 HAZOP 分析技术[J]. 安全与环境工程, 2005(4): 89-91.

[9] 吕似蕴, 蒋军成, 虞奇, 等. 基于 HAZOP-LOPA 的硝基苯生产装置风险分析[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(3): 129-134.