

CSB 经典案例分析—Isotec 公司生化工厂低温一氧化氮蒸馏装置爆炸事故

唐彬 天津市居安企业管理咨询有限公司

网站：www.justsafety.com.cn

电话：13802084672

邮箱：tangbin@justsafety.com.cn

摘要

本文结合美国化学品安全与危害调查委员会（CSB）对 Isotec 公司生化工厂低温一氧化氮蒸馏装置爆炸事故的调查，详细介绍了一氧化氮蒸馏装置发生爆炸事故的背景、过程与后果，并从过程安全管理、事故调查、土地管理以及过程危害分析等技术角度综合分析、总结导致事故的各方面原因，分享 CSB 调查组针对类似事故总结的经验教训。

关键词：低温一氧化氮、蒸馏装置、事故调查、土地管理、过程危害分析、美国化学品安全与危害调查委员会(CSB)

1. 事故简介

2003 年 9 月 21 日上午，位于俄亥俄州迈阿密镇的 Isotec 公司（西格玛奥尔德里奇公司（Sigma-Aldrich）的全资子公司）的生化工厂内，一组低温一氧化氮蒸馏装置发生爆炸，造成一名员工受伤，当地超过 2000 名居民紧急撤离 24 小时。



图 1：事故现场

2. 事故背景

2.1 公司简介

Isotec 公司是西格玛奥尔德里奇公司（Sigma-Aldrich）的全资子公司，位于俄亥俄州迈阿密镇。而西格玛奥尔德里奇公司则是一家跨国生命科学和高科技公司，总部设在密苏里州圣路易斯市。2001 年，西格玛奥尔德里奇公司从 Matheson 公司收购获得 Isotec 公司。

Isotec 公司从 1979 年开始主要生产用于疾病诊断和基因研究的生化产品。它是第一家用低温蒸馏技术生产稳定 ^{13}C 、 ^{15}N 、 ^{18}O 同位素产品的企业。其工厂位于德顿市（Dayton）以南 12 英里，75 号州际公路以西 0.5 英里。在过去的 20 年间，工厂附近的土地由农田变成了居民区，超过 500 处房子在附近建成。

该公司有全职员工 75 名，为 8 小时工作制，其中 10 名员工参与蒸馏装置操作。该装置从高纯度的液态一氧化氮中分离出一氧化氮同位素（含 ^{15}N 和 ^{14}N ）。两组装置 N3 和 N6 在爆炸事故发生当时是同时运行的，另外两组装置安装后并没有投入使用。



图 2：Isotec 公司的工厂俯瞰图

2.2 工艺描述

一氧化氮同位素富集是一种连续操作的蒸馏工艺，可以富集得到稳定的同位素。该工艺为 24 小时连续操作，一周 7 天，具体工艺流程为：

- 1) 在一氧化氮反应器中，二氧化硫、硝酸和水反应生成一氧化氮。然后，将一氧化氮产物与来自蒸馏塔的一氧化氮同位素混合，并通过干燥器和净化器除去水分和杂质。反应器中的其他产物如硝酸和硫酸被中和后排放到下水道。
- 2) 从净化器中来的高纯度的一氧化氮将被注入高 300 英尺的主蒸馏塔中，其中多条管线被密封在一个 16 英寸直径的绝热真空夹套内（如图 3 所示）。所有的管线和夹套都是不锈钢材质。一氧化氮管道、仪表管和接线以及连接反应器的电线都是经由顶部进入真空夹套的，这些组件均悬挂在一个直径 18 英寸的碳钢井套管中。塔顶的冷凝器和塔底的电子再沸器控制着温度，以满足蒸馏条件。冷凝器使用液氮和液氧作为冷却剂。10%富含同位素的一氧化氮被提取后可作为原料在工厂内的其他装置中转化为不同的产品。

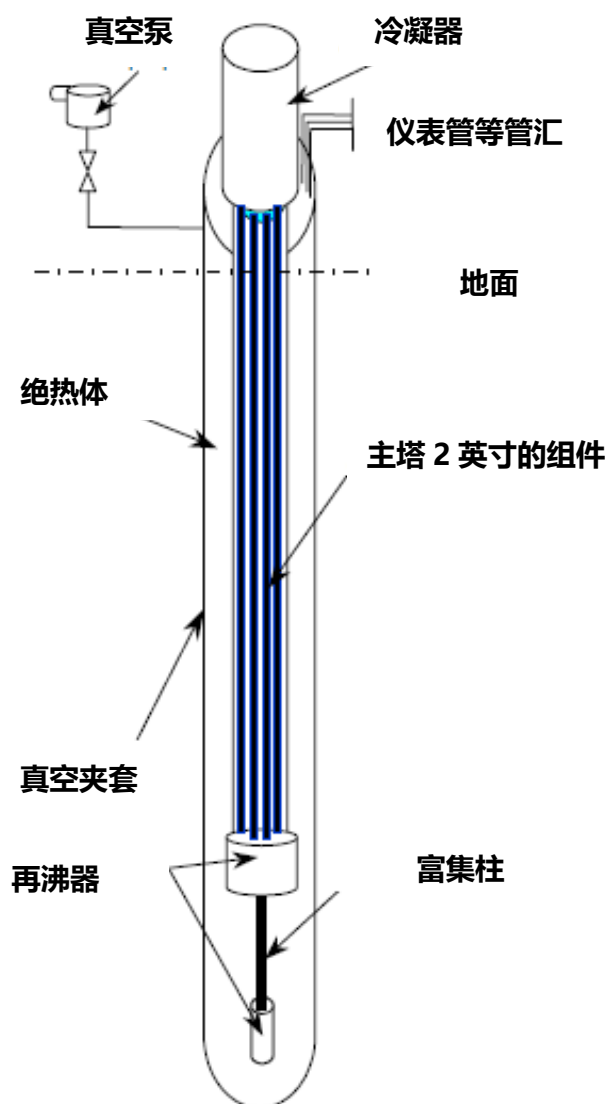


图 3 蒸馏塔主要构造

- 3) 含有稳定同位素一氧化氮的富集柱位于主塔的中心。在塔顶有一个独立的冷凝器，塔底有一个独立的电子再沸器，富集柱的操作条件与主塔一致。含 97%的稳定同位素的一氧化氮从富集柱底部出去后转至工厂内的其他设备中。

2.3 一氧化氮的危害

在大气环境条件下，一氧化氮为无色、无味的气体，并且有剧毒，对肺部有强刺激性。一氧化氮在大气中能迅速与空气发生反应，生成更为稳定的且同样有害的氮氧化物，如二氧化氮。带有强烈气味的红褐色气体就是一氧化氮泄漏的一个清晰表征。

液态的一氧化氮是一种低温流体。在处理时要注意防止人体皮肤冻结或者冻伤，因此要采取特殊的防护措施。在液态和固态形式下，一氧化氮是一种不可预测的，高度震动敏感的炸药。

Isotec 公司的管理人员意识到了气态一氧化氮的毒性危害和低温液态的冻伤风险，同时也明白固态和液态的一氧化氮具有高爆炸性，但却认为他们的设备发生爆炸的可能性非常低。

通过与 Isotec 公司的管理人员的探讨以及文件回顾，确认洛斯阿拉莫斯国家实验室（LANL）为 Isotec 公司提供过 20 世纪 70 年代中期引进蒸馏技术后的历史操作数据和爆炸风险研究结论。而在 1982 年，Isotec 公司发生过一次由于杂质或系统堵塞而导致的爆炸事故，涉及液态一氧化氮，该事故被认为与 1975 年洛斯阿拉莫斯国家实验室的爆炸事故相似。

1995 年，Isotec 公司发生另外一起蒸馏塔事故，尽管 Isotec 公司的调查团队得出结论认为是蒸馏塔的配件处发生爆炸，但是由于无法修复受损部分，因此也无法确认事故发生的真正原因或确切位置。

2.4 安全系统

- a) 针对一氧化氮的化学危害性，蒸馏装置中设置有一氧化氮探测器和报警系统，这些系统和温度、真空夹套压力报警组成了一个 BP 机系统，以提醒操作人员出现的工艺波动。

同时，该工艺的操作系统都是全自动化的，当存在工艺波动时，会发出自动停车信号，塔釜将进入全回流状态（全封闭系统循环）。操作人员对系统状态评估后再来决定接下来该采取什么措施来回复正常操作。

- b) 针对一氧化氮爆炸的不可预测性和高度震动敏感性的物理危害性特点，采取了大量的物理保

护设置来使其危害降到最低。包括：

- ◆ 蒸馏塔安装在井下套管中，以适应其极端长度，提供了一种高水平的“屏障”；
- ◆ 外部爆炸防护建筑（如图 4）的安装位置相较于 LANL 的设计做出升级，主要针对不容易发生的一氧化氮在地面设备中被点燃的事故场景，以对人员和设备起到保护作用。



图 4：N6 单元的外部爆炸防护建筑（与 N3 单元相似）

外部防爆建筑是一种敞开的矩形碳钢结构，每面墙都采用 2 层间隔 4 英寸的 0.5 英寸厚的板，间隔中采用沙子填充。尽管 Isotec 公司的管理人员报告说这种防护结构是采用了 LANL 设计，但其构造还是忽略了两个非常关键的安全因素：

- ◆ 重型钢丝网捕捉碎片；
- ◆ 在每面墙上都要有一个从顶部到底部的迷宫式的开口，以防止压力剧增，如图 5 所示。

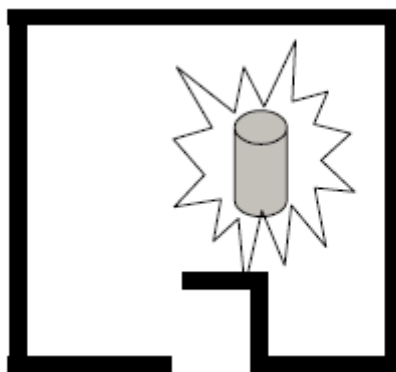


图 5：迷宫式开口以泄放压力并且可以防止碎片飞出

c) 另外，针对管线和容器超压，设计有压力机械泄放设备，以防止超压破坏。一氧化氮管线与

蒸馏塔的连接配备有压力泄放设施。

但是，在真空夹套中并没有设置压力泄放设施，尽管真空夹套不是压力容器，但由于其配备了截止阀，当截止阀关闭后，其内压力会显著升高。而此次事故发生当天上午，操作人员就为阻止一氧化氮泄漏，关闭了该截止阀。

3. 事故发生过程

2003 年 9 月 21 日，周日上午 7：30 分左右，Isotec 公司在线呼叫系统的操作员接到自动寻呼机警报，显示其一低温一氧化氮蒸馏装置处于警戒状况。当操作员在大约 7：50 抵达现场时，他看到红褐色气体从蒸馏单元的真空泵排气孔排出，这表明真空夹套内的管道有裂缝。

该名员工迅速通知生产总监，总监则马上报警，并通知了 Isotec 公司的管理层和母公司-西格玛奥尔德里奇公司。

之后，红褐色的气体从事故现场向西南方向移动并逐渐消散。上午 8：15，操作员关闭了真空泵的截止阀以阻止继续泄漏，不久以后，蒸汽就再也看不到了。操作经理和其他五名员工认为他们已经安全消除了 N3 蒸馏塔和真空夹套的一氧化氮，并且做好了必要的准备工作。

他们的操作流程是基于 1998 年 9 月 18 日发生的蒸馏塔故障时所采取的策略。当时，N4 蒸馏塔（设计与 N3 一致）发生一氧化氮泄漏至真空夹套中，并且从真空泵的排气孔排出。操作员密切监测压力和温度条件，成功地将一氧化氮从塔釜和真空夹套中清除。

事故发生当天，当泄漏终止后，工作人员开始安装临时管线来排放故障塔釜中的一氧化氮，同时，他们密切监测着塔釜中的压力。而塔釜中的压力一直稳定在 130psi，低于真空夹套计算破裂压力 1645psi。Isotec 公司人员注意到冷凝器一直在大量排放氮气，表明塔釜内热负荷在升高。

大约上午 10：15，在无任何预兆的情况下，发生剧烈爆炸，导致蒸馏塔、爆炸防护建筑以及周边的建筑毁坏严重（见图 6）。位于爆炸点 140 英尺外的主办公楼的窗户被冲击波冲毁，玻璃碎片划伤了 Isotec 公司一个员工的手，但没有其他员工受伤的报告。



图 6：一氧化氮处理单元爆炸造成的直径达 20 英尺、8 英尺深的弹坑和建筑损坏

小块的混凝土和金属碎片被冲到 1000 英尺之外的，落到了附近的建筑。该厂区以北的三处房屋被碎片击中，造成两处屋顶和一处落地玻璃损毁。爆炸防护建筑弹出的一块大钢板把一个 52,000 磅、高 42 英尺的一氧化碳容器被推出 10 英尺远。



图 7：52,000 磅、高 42 英尺的一氧化碳容器被防护钢板推出 10 英尺远

另一块防护钢板造成周边设备受损严重，破损的管线泄放出一氧化碳气体，遇点火源被点燃，燃烧近 1 个小时，直到一氧化碳容器内再无物料。



图 8：爆炸防护建筑受损严重

消防部门要求警方将附近居民撤离至 1 英里以外，以防止社区内居民遭受金属或其他碎片的伤害，撤离时间 24 小时。

4. 事故原因分析

4.1 事故评估

由于井壁上部坍塌，造成处于地下的蒸馏塔和真空夹套部分无法获得用于事故后分析，因此 CSB 也不能确定蒸馏塔管道发生泄漏的精确位置或造成泄漏的确切失效机理。可能的原因包括腐蚀、疲劳裂缝或材质退化。同样，也无法确定爆炸源是否在真空夹套内，或是否因冲击负荷造成爆炸。

从井套管顶部喷射出的蒸馏塔组件可以证实真空夹套内的塔管道经历了高温和极端破碎压力的冲击，而真空夹套的小金属碎片则表明爆炸威力之强。



图 9：事故现场破裂的不锈钢管道的以及真空夹套不锈钢碎片

4.2 事故场景

CSB 根据现场可用的物理证据分析后认为可能存在以下事故场景：

- ◆ 蒸馏塔的管道发生泄漏，一氧化氮泄漏进入真空夹套中后通过真空泵的排气口泄漏至大气中夹套真空度的损失严重降低了其绝热性能，从而导致蒸馏塔的热负荷增大。
- ◆ 通过关闭真空夹套的截止阀来阻止一氧化氮泄漏至空气中，当液态一氧化氮开始沸腾后，容器中的压力骤增，观测到的真空夹套内最大压力不超过 130psi，远低于夹套的预测失效压力，因此不会造成真空夹套的破裂。
- ◆ 一氧化氮继续通过管道的泄漏点进入真空夹套中，引爆后造成真空管道和夹套破裂。
- ◆ 一氧化氮的点火源很有可能来自冲击负荷的能量，而冲击负荷则可能来源于以下两个方面，一是液态一氧化氮在进入真空夹套时快速汽化产生，二是真空夹套中压力增大后造成再沸器的崩塌。

另外，现场矩形爆炸防护屏障可以阻止大量碎片的冲击，使员工和附近的应急救援人员免受伤害。但一旦该屏障结构彻底被破坏后，屏障结构本身会对周边的设施造成严重损坏，包括冲击一氧化氮容器，造成一氧化碳管线破碎，导致社区紧急撤离。

4.3 事故调查不到位

Isotec 公司的一氧化氮蒸馏装置从 1982 年到 2003 年，共发生了 4 起事故。Isotec 公司调查了每起事故的原因。但由于处于地下的真空夹套的设备损坏严重且无法获得其他证据，因此均无法

确定这些事故发生在真正原因。如果 Isotec 公司能够彻查这些事故原因并从中吸取教训，那么很有可能会避免此次 N3 蒸馏装置发生的这起灾难性的故障。

Isotec 公司在此次事故之前并没有充分调查之前的两起其他蒸馏单元发生的一氧化氮爆炸事故（N4 蒸馏塔故障，一氧化氮泄漏，1998 年；N2 蒸馏塔故障，1995 年）。由于未能分析出事故原因，没有采取相应的补救措施或吸取经验教训，导致相似的 N3 蒸馏塔发生了同样的事故。

4.4 过程安全管理缺陷

CSB 通过调查发现，Isotec 公司在过程安全管理的实施上存在一定的缺陷。而美国职业安全与健康管理局（OSHA）在 1992 年颁布的过程安全管理标准（29 CFR 1910.119），可以防止或尽量降低有毒、反应性、易燃或易爆化学品发生灾难性泄漏的后果。此次事故中的一氧化氮蒸馏装置属于该标准所覆盖的工艺设备。通过借鉴各相关机构的工艺良好实践和采用有效的过程安全程序，本可以阻止此次事故发生或使事故后果降低最小。

Isotec 公司和西格玛奥尔德里奇公司的过程危害分析（PHA）团队认为液态的一氧化氮存在爆炸风险，但是却没有理解该风险对于员工的严重性。

尽管其过程危害分析文档中记录液态一氧化氮爆炸是一种可能的场景，但分析过程中并没有综合阐述过往事故中一氧化氮爆炸场景，也没有全面回顾管理和工程上的控制措施来防止事故发生。因此无法系统追踪过程危害分析（PHA）的发现和相关的后续措施。过程危害分析是不全面和不到位的。

4.5 土地管理不当

Isotec 工厂于 1979 年建成，当时周围仅有几处房屋但到 2003 年 9 月，超过 500 处房屋、工厂和一处市政高尔夫场分布在工厂附近。而在工厂和住宅区仅有一个 50 英尺宽的缓冲带作为隔离。

因此，在周围土地管理上，当地政府没有充分考虑到公共安全风险。1997 年，该镇批准了一个分区开发计划，允许在该企业 40 英亩范围以内进行开发，但 Isotec 公司出于公共安全考虑并未同意。

4.5 应急响应存在的问题

在系统报警发出后、爆炸发生之前，一氧化氮泄漏被制止后，蒸汽云马上消散。当地消防部门经

过与 Isotec 公司操作管理人员确认，认为当时没有必要进行人员疏散。紧急救援人员提醒 Isotec 公司员工要监测蒸馏装置的状态，并做出应对一氧化氮泄漏出蒸馏塔的应急计划。2 个小时后，没有任何预兆，蒸馏塔爆炸。

爆炸后，现场参与救援的人员考虑到装有 26 吨一氧化碳的容器可能会发生失效，因此马上下令进行撤离，影响了超过 2000 名居民、一座教堂、一个高尔夫球场和附近的商业区。警方采用挨家挨户通知、BP 机系统、网络电视等多种方式来通知居民。

事故后两周，CSB 调查员在调查过程中发现了一些问题：

- ◆ 一些警察通知要求紧急撤离，而一些则是建议撤离；
- ◆ 一些居民没有收到撤离通知；
- ◆ 一些居民是从邻居那里得到撤离的指令；
- ◆ 一些居民不清楚撤离的时候去哪里，哪里有避难所或有哪些辅助设备可用。

5. CSB 总结的经验教训

- 1) 尽管 Isotec 公司和西格玛奥尔德里奇公司在进行过程风险分析时认为存在一氧化氮爆炸的可能性，但没有采取相应的措施来降低风险，而一套完整的过程风险分析要全面研究所有识别出的风险、文档，并跟踪相应采取的措施，评估安全系统设计的基础记录（如防爆屏障和超压保护计算结果）和工艺设计信息。
- 2) 尽管 Isotec 公司的一氧化氮蒸馏装置发生过两次事故，包括液态一氧化氮的爆炸，但两次事故的调查记录是不完整的，既没有事故发生原因的分析，也没有相应的措施来防止事故再发生。而事故调查结果是过程风险分析的重要输入。
- 3) 当地政府没有能够考虑已有的化工企业的存在化学物质泄漏等风险，而在其周边批准建设包括居民区、商业区等公共区域，政府要协调开展审查活动。Isotec 公司和西格玛奥尔德里奇公司决定不再重启一氧化氮蒸馏工艺，并将停用 N6 设备单元，要求化工公司在轻工业区域内运营时获得使用许可，并扩展轻工业区内的缓冲带。
- 4) 在此次事故中，一些居民没有及时得到撤离通知，一些则就没有得到通知，而且通知的信息也是不连续和不完整的，造成了撤离过程中的困惑。而当地政府准备的社区应急响应



期号：2019-05

天津市居安企业管理咨询有限公司

应方案中应包括撤离流程等内容，同时也应开展应急响应演练等活动，增加沟通方式，将公众宣传活动用于在紧急事故中的社区通知。