

CSB 经典案例分析—美国 Sonat 公司吹扫作业分离器超压破裂和火灾事故

唐彬¹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

何琛²上海于睿商务咨询有限公司



扫描二维码关注我们吧!

关键词：吹扫作业、设备超压、火灾、美国化学品安全与危害调查委员会(CSB)

摘要

本文结合美国化学品安全与危害调查委员会（CSB）对美国 Sonat 公司油气生产设施吹扫作业过程中发生的分离器超压破裂和火灾事故的调查，描述分离器超压破裂和火灾事故的发生过程，并从技术和管理角度综合分析、总结导致 Sonat 公司油气生产设施吹扫作业分离器超压破裂和火灾事故发生的直接原因和间接原因，并分享 CSB 调查组对此次事故的建议。

1. 事故简介

1998 年 3 月 4 日，位于美国路易斯安那州的 Sonat 勘探开发公司的油气生产设施发生一起灾难性的容器失效和火灾事故。该设施建有两套油气分离装置（测试装置和量产装置），包括分离设备、管线、储存容器和气体集输系统。油气分离装置设计目的是以附近的两口油井的井流为原料，生产原油和天然气。容器由于超压，造成可燃物料泄漏，并被点燃发生火灾。事故造成容器附近的 4 名工人死亡，生产设施遭到严重损坏。图 1 为事故后照片。



图 1：事故后现场照片

2. 事故背景

2.1 Sonat 公司

Sonat 公司是一家从事石油勘探开发、油气生产、州际天然气运输和能源服务的综合能源公司，Sonat 勘探开发公司是 Sonat 公司旗下主要负责油气勘探开发和生产的分公司。Sonat 运营着位于路易斯安那州的 West Masters Creek 油田，从奥斯汀白垩层中生产石油。从这些油井中采出的原油直接送至油气分离装置，分离出原油和天然气，然后销售。从原油中分离出的生产水最终再注入地层。

2.2 装置操作

该油气生产设施以附近的两口油井井流为原料，通过连续的分离工艺生产原油和天然气，如图 2 所示。油气生产设施包括多个分离器、管线、储罐和一些辅助设备。为了有效分离油井原油物料，Sonat 公司建造了两套独立的分离装置，分别作为测试装置和量产装置。测试装置的能力只能处理单口井的井流，而量产装置能够同时处理多口井的井流。两套分离装置通过连接至 Temple 22-1 井和 Temple 24-1 井的管汇相连，装置与 Temple 22-1 井和 Temple 24-1 井的距离分别约 82m 和 3200m。测试装置于 1998 年 1 月 16 日开始生产处理从 Temple 22-1 井采出的原油。量产装置于 1998 年 3 月 4 日第一次投产，处理从距离较远的 Temple 24-1 井采出的原油。

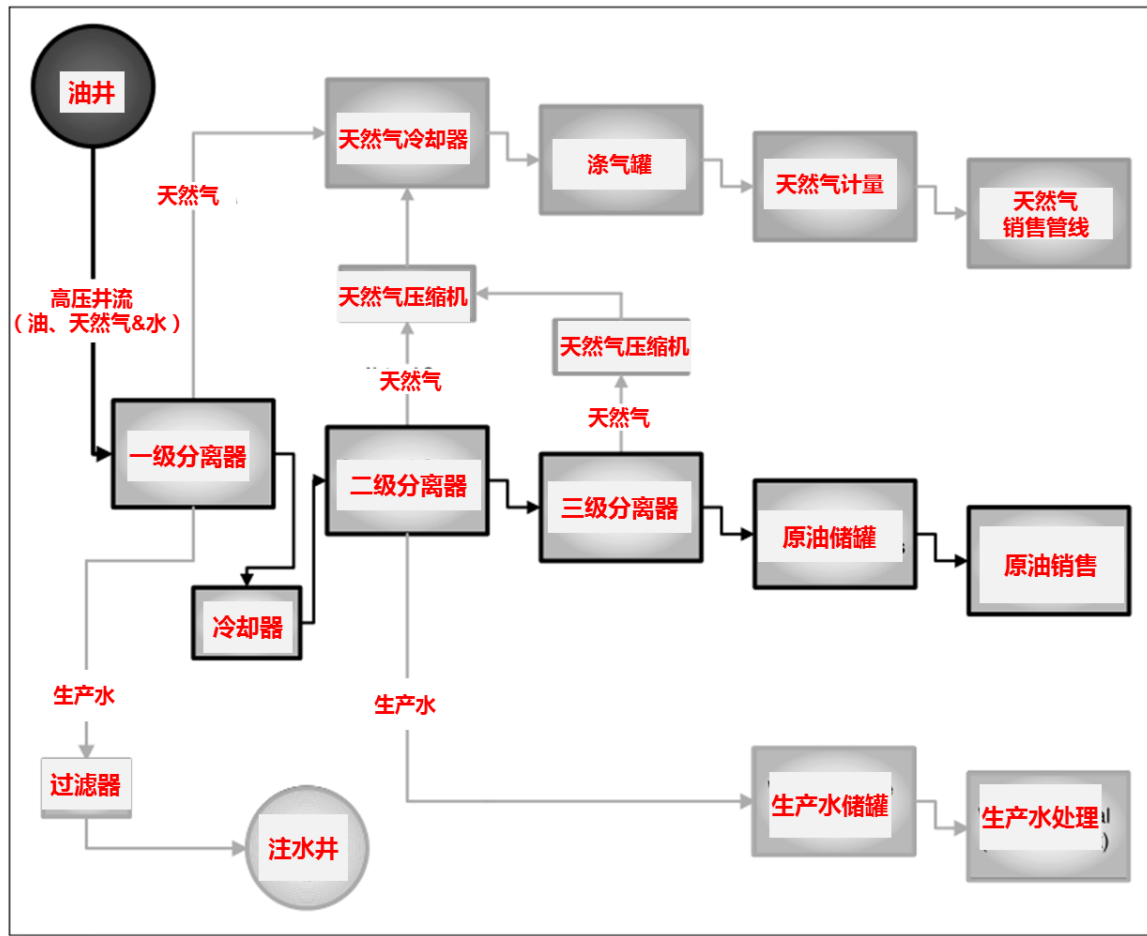


图 2：原油分离流程简图

每一套油气分离装置都包括 3 台串联的分离器，设置多台分离器的目的是最大化天然气回收量。一级分离器和二级分离器的最大允许操作压力分别是 9.9MPa 和 3.4MPa，当压力超过其最大允许操作压力时会启动位于分离器顶部的泄压阀。一级分离器和二级分离器的实际操作压力稍低，分别为 6.2MPa 和 1.6MPa。三级分离器（虽然 Sonat 公司将这个失效的容器称作“蒸汽回收塔”或“储罐”，但是 CSB 调查组认为该容器实际上符合油气分离器的定义，称其为三级分离器的原因是它位于一级分离器和二级分离器的下游）的最大允许操作压力为常压，也是正常运行时的压力。由于物料通过一系列分离器时压力下降，物料中天然气的溶解度随之降低，分离回收的天然气比例增大。

前两级分离器设计是用于三相（油/气/水）分离，而三级分离器设计是用于两相（油/气）分离。油井物料在前两级分离器内的停留时间足以实现油相和水相的重力分离，分离器出来的天然气直接进入天然气管线，生产水直接注入地层或者暂存在储罐中。油相从一个分离器进入下一个分离器，最终进入储罐，通过槽车运至炼油厂。天然气经压缩后通过管线送到天然气处理装置。

测试装置和量产装置的三级分离器都是 13.7m 高，直径为 1.2m，如图 3 所示。运行过程中，容器内存料约为 80%，油井物料从约 10.7m 高位置进入分离器，分离的油相从约 1.0m 高位置出来。残余的天然气从油相中出来并在分离器顶部聚集，通过压缩机，然后与二级分离器出来的天然气汇合。

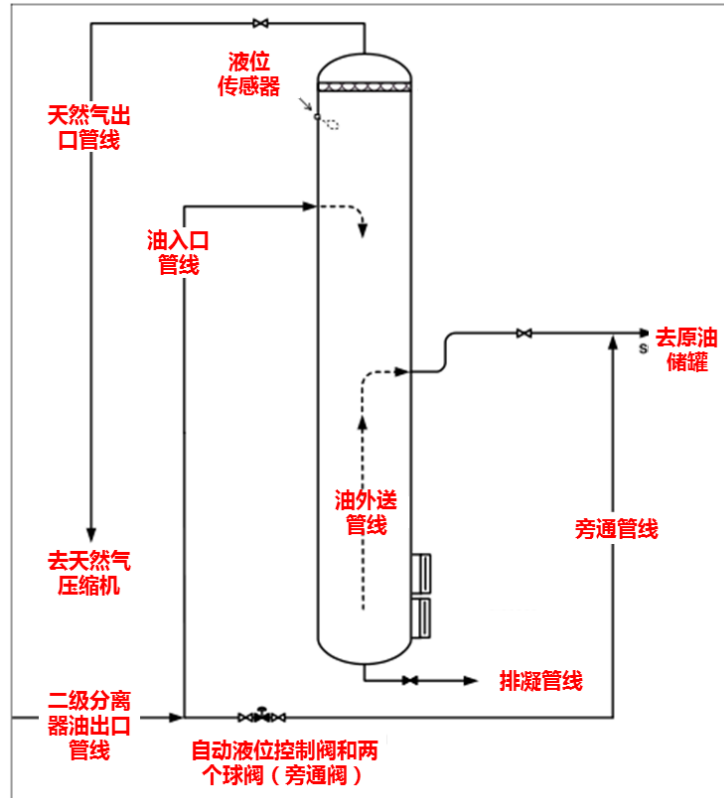


图 3：三级分离器示意图

3. 吹扫作业设备超压和火灾事故发生过程

3.1 事故发生前

1998年3月4日，Sonat公司计划利用新建的量产分离装置开始Temple 24-1井的生产。在正式生产前，量产装置的设备以及连接油井和设备的3200m长的管线需要进行吹扫，排出设备及管线内的空气。吹扫是油气生产工艺中的常规操作，目的是降低可燃油气造成的爆炸风险。在这次事故中，吹扫操作是通过使用其中的1口油井采出的高压井流置换设备内的空气，被置换的空气从一个敞开的储罐孔口处释放出来。当系统内的空气浓度足够低时，设备将封闭，准备开始生产。

Sonat公司监督决定通过2个阶段执行吹扫过程：（1）使用附近的Temple 22-1井产流体吹扫

量产装置设备；（2）使用Temple 24-1井产流体吹扫连接Temple 24-1井和装置的3200m长管线。每次吹扫都需要操作一系列的阀门。

第一次吹扫操作（量产设备的吹扫）在事故当天的下午顺利完成。

3.2 事故发生

量产装置设备吹扫操作完成后，开始准备吹扫连接24-1井的3200m长管线。如图4所示，他们的吹扫方案如下：

- 由24-1井至量产装置（打开：阀1；关闭：阀23、阀24、阀26）；
- 由量产装置至储罐，旁通分离器和原油冷却器（打开：阀8、阀9、阀10、阀11、阀12、阀13、阀16；关闭：阀2、阀3、阀4、阀5、阀6、阀7、阀14、阀15）；
- 经过储罐，从敞开的顶部孔口出去（打开：阀17、孔口21；关闭：阀18、阀19、孔口20）

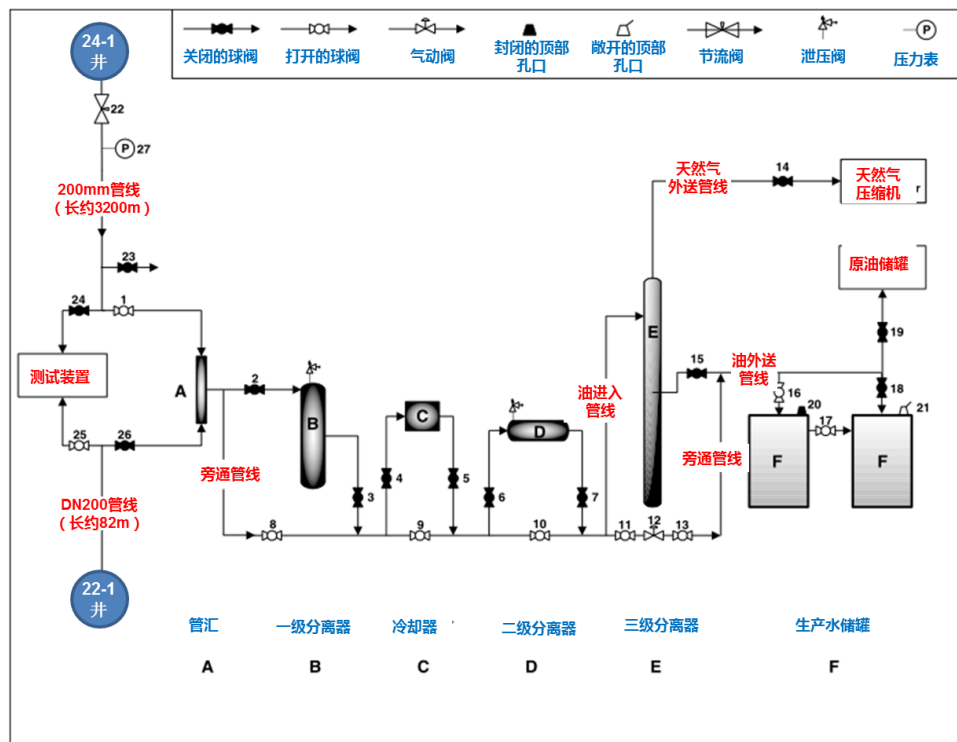


图4：最终的阀门设置方案

执行这个吹扫方案，至少需要手动重置11个阀门，这个过程没有书面操作程序和阀位检查表。大部分阀门是手动操作的球阀，阀12是一个通过位于三级分离器内部的液位计启动的气动阀门。该设备出现高液位时，会自动打开阀12，允许流体旁通分离器（在邻近的手动球阀11和球阀13打开的情况下）。3月4日上午，操作人员断开了连接阀12的仪表气，导致之后阀12一直处于打开状态。

当施工监督和操作人員重置了上述閘門，管線吹掃操作開始進行。Sonat公司生產監督和一名操作人員位於24-1井的附近，與施工監督通過無線電保持溝通。下午5:10，生產監督指揮操作人員打開閘22（位於油井下游的節流閘），引導流体進入3200長的管線。根據預測，初始井流將主要是天然氣，後期將是天然氣、油和水的多相混合物。Sonat施工監督位於閘23附近，他打開了這個小閘門，使用移動式氧氣檢測儀測試排出氣體中的氧氣濃度，氧氣濃度的下降表示出吹掃操作的進度。

隨著吹掃操作的進行，根據監測，閘23處的氧氣濃度開始下降，施工監督關閉了閘23。他每隔幾分鐘打開閘23，繼續定期檢測氧氣濃度。下午6:00左右，根據壓力表27的顯示，閘22下游壓力約5.5MPa。下午6:10，施工監督最終檢測到的氧氣濃度低於3%，表示吹掃過程已接近完成。隨後他乘坐汽車去檢查一個距離約90m遠的管線閘門的閘位，此時，之前在24-1井附近的生產監督開始開車回裝置，指揮量產裝置的開車操作。

下午6:15左右，量產裝置的三級分離器發生災難性的失效，從破裂的分離器中泄漏出來的可燃氣體立即被點燃，在分離器位置上部形成巨大火球。位於分離器附近區域的4名操作人員當場死亡，1名距離分離器約60m的操作人員被爆炸衝擊波推出2m遠，施工監督從汽車里出來時也受到輕傷。

一名幸存的承包商操作人員立即啟動應急關斷設備，自動關閉了正向測試裝置供料的22-1井。Sonat施工監督立即使用無線電指揮操作人員關閉24-1井，并向Sonat生產監督報告。施工監督然後開車去關閉了天然氣計量管線閘門。雖然設備失效後24-1井很快被關斷，但是3200m長的管線內還存有大量的的高壓天然氣。天然氣持續從被破壞的管線中泄漏出來，嚴重阻礙了火災控制行動。應急人員最終於晚上9:47成功撲滅所有火災。

4. 吹掃作業設備超壓和火災事故分析

4.1 初始事件

根據事故後對現場情況的調查發現，與計劃中的閘門設置情況不同的是，閘11和閘13實際上處於關閉狀態。在這兩個閘門關閉的情況下，吹掃氣不能按計劃排放到大氣中，如圖5所示。三級分離器沒有入口閘，導致設備出現超壓。事故發生前，節流閘下游壓力約5.5MPa。

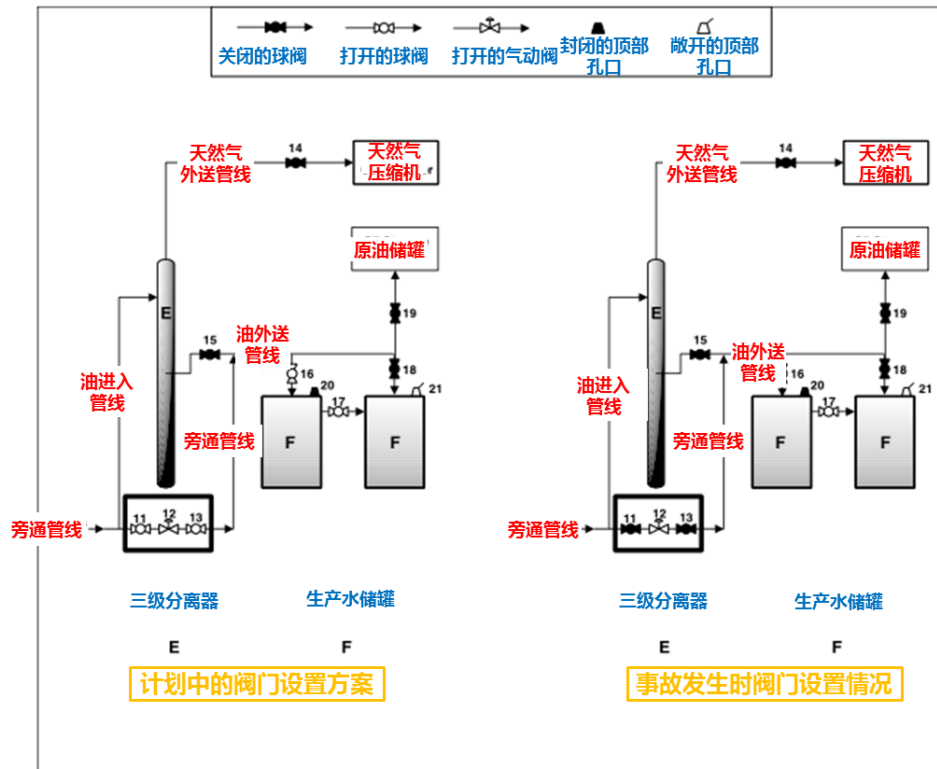


图5：阀门设置情况对比分析

三级分离器设计上只能用于常压操作，吹扫气形成的高压突然导致容器发生灾难性的失效，三级分离器破裂时有4名作业人员位于其12m范围内。

目前不能确定设备发生失效时的真实压力，制造商针对分离器只在0.14MPa压力下进行过测试。CSB调查组委托Oak Ridge国家实验室对该分离器进行了理论研究，通过基于有限元方法的应力分析，发现当内部压力达到0.94MPa及以上时，分离器将发生失效。Oak Ridge国家实验室进行另一次工程设计分析预测失效压力约为1.4MPa，而事故后Sonat公司评估失效压力为2.6MPa~2.8MPa。但是，所有这些评估数值都是基于设备的设计图纸进行的，没有考虑到实际情况下材料、尺寸和焊接质量等因素的影响。

同样，阀11和阀13的关闭时间也不能完全确定。这两个阀门在事故当天上午还处于打开状态，但是在下午早些时候（量产装置分离器吹扫前）被关闭。在事故当天，这两个阀门没有被持续监控。很可能在最终吹扫过程前这两个阀门没有按计划被重新打开，并保持关闭状态，直到设备最终超压失效。或者，这两个阀门可能在最终阀门设置时被打开了，只是后来又被手动关闭了。

4.2 设备设计、安装和操作

三级分离器设计和安装方面存在的缺陷是导致此次事故的一个重要原因。可能暴露在超压危险（因为人为失误或机械失效）情况下的设备应：a）设计上能承受超压条件；或者b）安装合适的泄压系统。一套合适尺寸的泄压系统本能够阻止此次事故的发生。

API推荐标准规范涵盖了不同类型油气生产和炼化方面的应用。三级分离器符合ANSI/API 12J-1992 “油气分离器规范”，该规范包括了关于油田类型的油气分离器和油气水分离器的设计、建造和出厂检验的最低要求，规范中要求所有的分离器（不考虑尺寸和压力）都应安装压力保护设备，并根据ASME标准要求设置，分离器投入使用前应提供超压保护措施。

API 521 “压力释放和减压系统指南”提供了更广泛的指导要求，API 521列出了设备需要考虑的一系列超压场景，16个超压场景的第1个就是“容器上的封闭出口”。

Sonat公司制定了自己的泄压阀标准，建立了泄压阀及附属管线的规格、安装、维护及测试的统一要求。标准要求：应根据良好的工程规范，考虑失效的可能性和失效后果，使用泄压阀，API 520可以作为泄压阀和附属管线安装的指导规范。

Sonat公司把失效的设备称作“蒸汽回收塔”，因此不属于API关于分离器标准的范围。

Sonat公司把蒸汽回收塔归类为储罐。CSB调查组审查了这个问题，最终认为这个设备实际是一个分离器，因为：

- 设备只有一个天然气和原油混合物的入口管线，但是有两个独立的天然气和原油的出口管线，进行了两相的分离；
- 设备设计上不是用于固定储存原油的，相反，原油只是暂时储存在设备中，然后持续流入真正的储罐中；
- 设备在量产装置内的位置（在二级分离器和储罐之间）符合低压、两相分离器的角色；
- ANSI/API 12J-1992把分离器定义为：油田使用的用于把液相从气体组分中除去的设备，分离器可以是两相的或者三相的。

在量产装置投产前，三级分离器本应根据API标准要求安装一套泄压系统。

另一个设计缺陷是三级分离器上游缺少入口切断阀。这样一个切断阀本能够把分离器与造成设备失效的高压吹扫气隔离开。三级分离器油相出口管线上的切断阀（阀15）可以实现分离器和储罐的隔离，而储罐顶部的孔口是一个排空泄压的可能途径，但是事故发生时，阀15是关闭的。三级分离器还有一个去气压机的出口管线，进入气压机的多余物料会排入火炬放空。但是，气相出口管线上也安装了一个切断阀（阀14），事故发生时，气压机处于停用状态，

而且阀14处于关闭状态。

4.3 工程设计审查

Sonat公司在装置的设计和建设过程中使用的是自己的工程师和咨询师，Sonat公司声称其工程师都去了22-1井现场，不幸的是，这些人没有发现蒸汽回收塔上的阀门错误问题。

Sonat公司在装置开车前进行的一系列活动没有形成有效的工程设计审查过程，一个有效的审查过程应包括至少一次在装置设计过程中进行的书面危害分析。危害识别应提出需要进行设计变更，或者有书面的回复，说明识别出的危害未被处理的原因。这个过程需要不同专业人员（包括设计工程师、工艺工程师和装置操作）的参与。设计审查过程本应提前发现并修正设计上的缺陷，包括缺少泄压阀、阀位不正确和不符合分离器设计与安装规范。在这起事故中，由于缺少正确的工程设计图纸，设计审查过程没有正确执行。

4.4 操作规程

Sonat公司的书面安全操作规程涵盖了常规主题，例如进入受限空间、设备挂牌上锁等。但是，对于油气生产装置，Sonat公司没有制定书面的操作规程。Sonat公司表示更喜欢通过口头指令培训和指挥装置操作。因此，操作人员没有得到任何关于特定生产活动的书面操作规程，例如测井、装置开车、设备吹扫和分离器操作等。设备操作的程序由有经验的操作人员口头告知新员工。

书面的操作规程可以促进安全、高效的作业，还可以降低人员失误的可能性，避免造成事故。这套油气生产装置设置了很多手动操作的阀门，为了装置的安全开车，必须正确设置阀门的状态。对于非常规操作，例如装置开车或吹扫，制定书面的操作规程是非常重要的。书面操作规程（包括检查表、图表、多个操作人员之间的信息反馈等）可以降低人员失误的可能性，预防造成灾难性的后果。

4.5 员工培训

Sonat公司的人员培训项目包括三部分：特定作业培训、月度内部安全会议和外部培训。特定作业培训是员工学习生产装置操作技术的最基本途径，Sonat公司高级员工为新员工提供培训。Sonat公司员工还参加每月的安全会议，包括安全培训。每次参会的人员会被记录。会上会分享学习近期发生的事故和关于风险沟通、泄压阀和设备挂牌锁定等主题的课程。另外，一些员工还会参加外部培训课程，例如压力容器操作、危险废物操作和应急响应、急救

等。

Sonat公司没有建立特定作业培训的评估程序，可能导致员工接受错误的、不安全和不完整的操作规程培训，以及不理解传递给他们的信息。

4.6 管理问题

如果Sonat公司油气生产设施更好、更有效地遵循了过程安全管理原则或者好的工程实践，这起事故是可以避免发生的。油气生产设施需要处理大量的可燃和有毒物料。处理类似危险物料的设施（例如炼油厂）要符合OSHA过程安全管理标准（29 CFR 1910.119）的要求，标准中的2个关键要素（工艺危害和书面操作规程）是Sonat公司事故暴露的两个关键问题。除了过程安全管理标准，还有许多其他关于良好过程安全实践的信息，包括美国化工过程安全中心的出版书籍和美国石油学会的推荐标准规范。例如，API 750涵盖了过程安全的很多重要方面，包括工艺危害分析、工艺安全信息（包括工艺流程图和PID）、书面操作规程、操作人员培训和符合性审核等。

5. 吹扫作业设备超压和火灾事故原因

5.1 根本原因

（1）Sonat公司管理层没有进行正式的工程设计审查，在设施设计和建造过程中没有进行有效的危害分析。

在这起事故中，三级分离器被暴露在远超其最高允许操作压力的压力下，导致设备发生灾难性失效。在设施设计过程中，本应该进行正式的工程设计审查过程。Sonat公司在没有工艺设备设计图纸的情况下建造了生产设施。在没有正确的工程设计图纸的条件下，不能有效地进行设计审查，也不能进行有效的危害分析。

正式的设计审查和危害分析过程能提供更好的机会，分析可预见的与正常操作程序发生偏离时的后果，这一过程很可能识别出三级分离器发生灾难性超压的危险，发现设置泄压系统的必要性。

（2）Sonat公司的工程规范没有确保可能暴露在超压危害条件下的设备得到泄压装置的充足保护。

发生失效的设备符合的两相油气分离器的定义，设计上应满足相关的行业标准中关于压力泄

放的要求。例如，ANSI/API 12J-1992 “油气分离器规范”要求分离器应安装压力泄放装置。

5.2 间接原因

(1) Sonat公司管理层没有向操作人员提供关于装置开车和设备操作的书面操作规程。

装置运行的每个阶段都应制定相应的书面操作规程，针对吹扫作业，应采用书面检查表和图表验证各个阀门阀位设置的正确。

6. CSB 调查组建议

(1) Sonat公司应根据良好工程实践，针对所有的油气生产设施开展正式的工程设计审查过程和工艺危害分析。

(2) Sonat公司应建立相应程序，确保所有的可能存在超压危害的油气生产设备均安装合适的泄压系统。

(3) Sonat公司应针对油气生产设施制定书面操作规程，并确保所有的工作人员（包括承包商员工）都接受操作规程的培训，确保操作规程至少涉及了吹扫作业和开车操作，并提供了工艺相关的危害信息。

(4) API应制定并发布关于油气生产设施安全开车和操作的推荐标准规范，规范至少应涉及以下方面：项目设计审查过程（包括危害分析）、书面操作规程、员工和承包商培训和所有可能存在超压危害的设备的压力泄放要求。

7. 参考文献

- [1] CSB INVESTIGATION REPORT , CATASTROPHIC VESSEL OVERPRESSURIZATION(4 DEATHS). Report No. 1998-002-I-LA.
- [2] ANSI/API Specification 12J-1992, “Specification for Oil and Gas Separators,” 7th ed. (Washington, DC: American Petroleum Institute, 1989). API specifications are nonmandatory guidance documents but are reflective of industry good practice.
- [3] API Recommended Practice 750, “Management of Process Hazards” (Washington, DC: American Petroleum Institute, 1990).
- [4] API Recommended Practice 521, “Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems,” 4th ed. (Washington, DC: American Petroleum Institute, 1997).
- [5] Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Writing Effective Operating and Maintenance Procedures (New York: American Institute of Chemical Engineers, 1996).



天津市居安企业管理咨询有限公司 期号：2017-07

居安咨询与 2015 年 7 月成立微信公众平台，旨在提升化工各行业企业安全管理绩效为目标，以整合专业安全资源为途径，致力打造国内组具有实用性的安全理念，安全知识，安全技术以及安全良好实践发布、共享、传播、在线交流互动平台。在我们平台上有我们原创的安全相关的知识性文章发布，若您感兴趣也可以给我们投稿，我们会有相应的稿费哦，投稿邮箱：tangbin@justsafety.com.cn。扫描下面的二维码加入我们吧！

