



中国石油和化学工业协会培训中心 期号：2017-10

天津市居安企业管理咨询有限公司

CSB 经典案例分析—埃克森美孚石油公司 Baton Rouge 炼油厂异丁烷泄漏和火灾事故

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

中国石油和化学工业协会培训中心

联系人：张瑞涛

电话：13601168926

邮箱：zsxzrt@163.com

关键词：炼油厂、异丁烷、泄漏、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）对美埃克森美孚石油公司Baton Rouge 炼油厂异丁烷泄漏和火灾事故的调查，详细梳理操作人员拆除旋塞阀齿轮箱过程中造成异丁烷泄漏和火灾的背景、过程及后果，并从技术和管理角度综合分析、总结导致事故的各方面原因，并分享CSB 调查组针对此次事故提出的改善建议和措施。

1. 事故简介

2016 年 11 月 22 日，位于美国路易斯安那州 Baton Rouge 的埃克森美孚石油公司炼油厂（简称“Baton Rouge 炼油厂”）内，硫酸烷基化装置（使用硫酸作为催化剂，把异丁烷和烯烃转化成汽油）发生一起异丁烷泄漏和火灾事故，造成 4 名工作人员严重受伤。事故发生时，操作人员正在从一个旋塞阀上拆除出现故障的齿轮箱，他卸掉了阀门承压部件（称作“顶盖”）上的关键螺栓，当他试图使用管钳拧开旋塞阀时，阀门突然脱离，导致异丁烷泄漏，形成可燃气体云。异丁烷泄漏后不到 30s，可燃气体云遇到点火源引发火灾，导致没能及时撤离的 4 名工作人员严重烧伤。



图 1：事故现场图

2. 异丁烷泄漏和火灾事故发生过程

2016 年 11 月 22 日下午，Baton Rouge 炼油厂硫酸烷基化装置的 2 名操作人员正在准备对异丁烷设备进行维护作业。作为准备工作的一部分，操作人员需要调整阀门状态，启动备用的异丁烷输送泵，如图 2 所示。为了启用备用泵，操作人员需要打开备用泵上游的入口旋塞阀。Baton Rouge 炼油厂硫酸烷基化装置中使用了很多这种类型的直角回转式旋塞阀，包括异丁烷输送泵的入口阀。

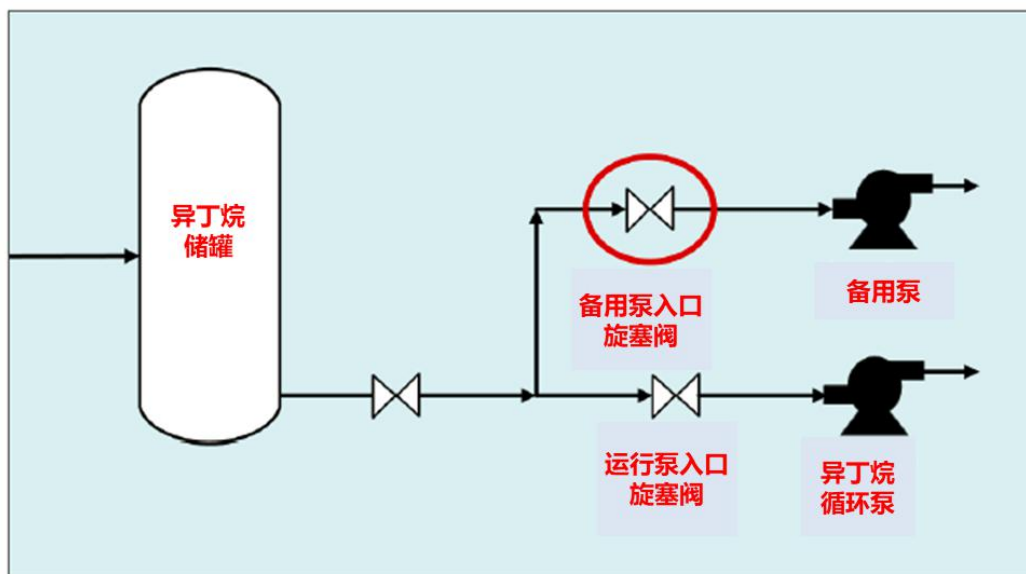


图 2：烷基化装置异丁烷泄漏位置流程简图

这种旋塞阀不经常使用，通常手动操作，操作人员需要转动连接齿轮箱的手轮打开或者关闭

阀门，如图 3 所示。手轮旋转把阀杆调整到打开或者关闭位置，一个支架通过螺栓把齿轮箱和阀体连接在一起。事故发生当天的下午，一名操作人员试图通过连接阀门的手轮打开备用泵入口的旋塞阀，但是齿轮箱出现故障，不能正常动作，虽然转动手轮，阀门仍然没有打开。

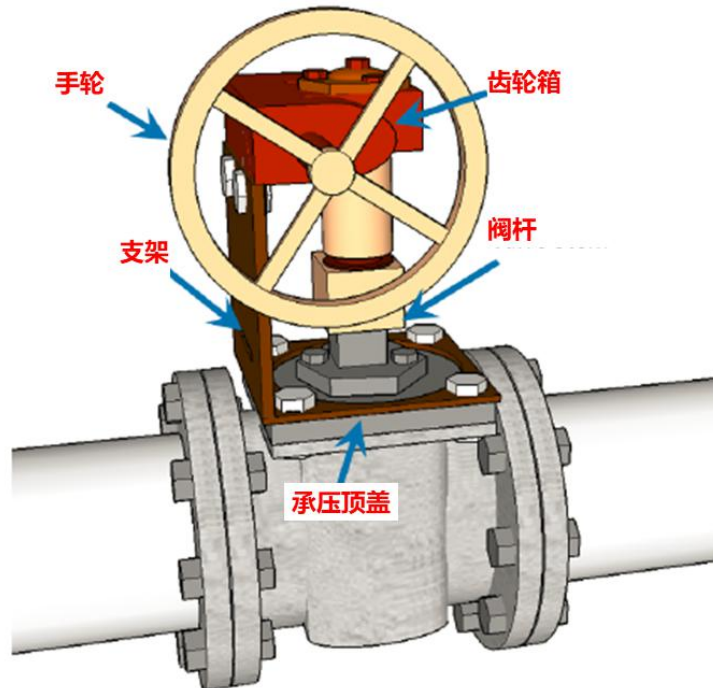


图 3：事故中涉及的旋塞阀示意图

一名操作人员拆除了齿轮箱总成，以便他能使用管钳旋转阀杆，从而打开阀门。对于 Baton Rouge 炼油厂硫酸烷基化装置的操作人员来说，从旋塞阀上拆除故障的齿轮箱是一种习惯做法。为了拆除齿轮箱，操作人员卸掉了用于连接齿轮箱支架和阀体的 4 个垂直螺栓。但是，这 4 个螺栓还起着固定阀门顶盖（阀门承压部件）的重要作用。需要注意的是，通过卸掉 2 个水平螺栓可以安全地从支架上拆除齿轮箱，但是这 2 个水平螺栓还在原处，如图 4 所示。

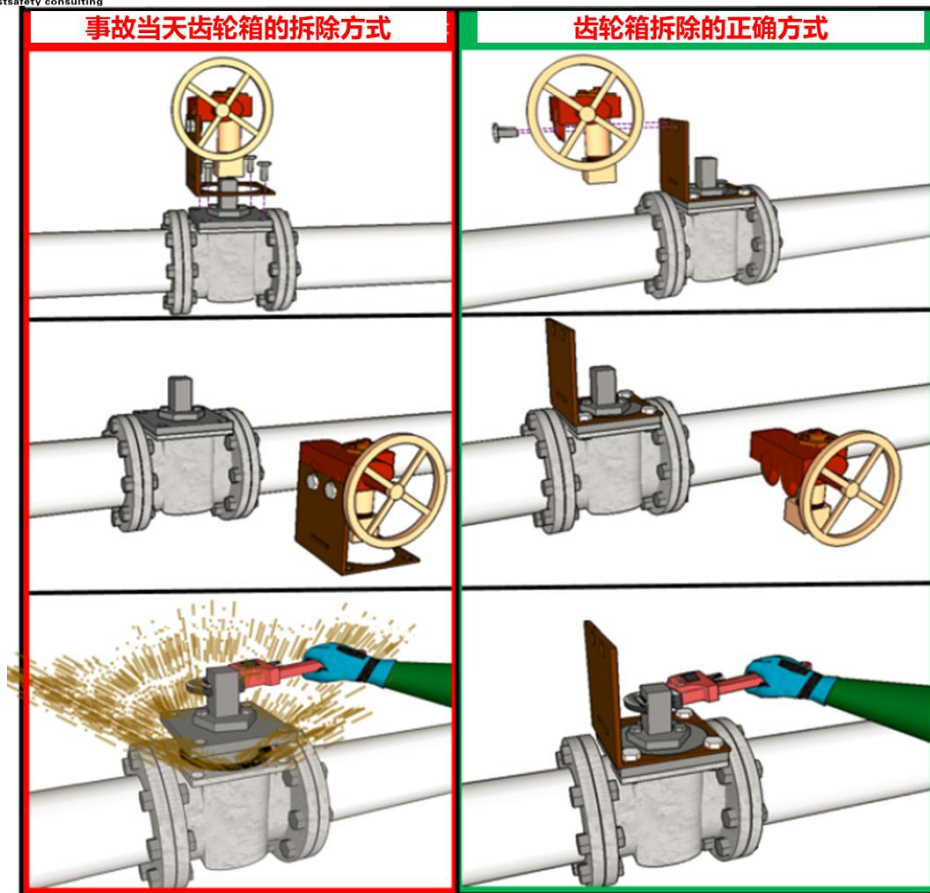


图 4：齿轮箱拆除方式对比

然后一名操作人员负责使用管钳旋转阀杆，打开阀门，另一名操作人员在旁边监护。由于固定阀门顶盖的 4 个垂直螺栓被卸掉了，造成关键的阀门部件不能再被有效固定。当操作人员旋转阀杆时，旋塞阀出现松动并发生脱离，带压的异丁烷（压力约 0.14MPa，温度约 7.2℃）从阀体中泄漏出来，迅速形成白色的可燃气体云。

泄漏事件发生后，现场操作人员向装置区域内的其他人员呼喊，包括位于脚手架上的作业人员，提醒他们立即疏散。其中一名操作人员通过对讲机向内操报告，让他紧急关停装置。

埃克森美孚石油公司估计事故中大约有 900kg 异丁烷泄漏到大气中。根据现场监控录像，可能是一台距离泄漏位置约 20m 的带电焊机点燃了可燃气体云。火灾造成 1 名埃克森美孚石油公司员工和泄漏位置附近的 3 名承包商三级烧伤。应急人员隔离了泄漏点，约 25min 后扑灭了火灾。

3. 异丁烷泄漏和火灾事故分析

Baton Rouge 炼油厂安全管理系统存在的一系列缺陷，造成旋塞阀齿轮箱和旋塞阀承压顶盖



以错误的方式被拆卸，最终导致异丁烷的泄漏和火灾。这些缺陷包括：

- 没有识别和正确处理老式旋塞阀设计和齿轮箱可靠性问题；
- 未进行人为因素评估，识别老式旋塞阀设计和可靠性问题，以及阀门操作和维护相关的潜在风险；
- 没有制定书面的操作规程，详细说明从旋塞阀上拆除齿轮箱的具体步骤，实现安全地打开或者关闭阀门；
- 关于如何安全地拆卸不同类型的旋塞阀齿轮箱，以及这类作业相关的潜在风险，没有对作业人员进行培训；
- 在没有制定详细的操作程序和安全作业培训的情况下，企业允许操作人员拆除出现故障的旋塞阀齿轮箱。

3.1 旋塞阀齿轮箱可靠性

Baton Rouge 炼油厂烷基化装置使用的这些旋塞阀，操作起来比较困难。即使在低压条件下，旋塞阀的工作扭矩也很大。实际上，Baton Rouge 炼油厂烷基化装置操作人员告诉 CSB 调查组，他们在操作齿轮箱时遇到过很多问题，例如手轮空转或者卡住。一名工作人员称这种现象是存在已久的常见问题。

另一名操作人员解释道，旋塞阀本身运行没有问题，齿轮箱存在严重的可靠性问题，例如齿轮脱离或者断裂。在讨论齿轮箱可靠性问题的发生频率时，操作人员说，类似问题发生的次数之多，足以让操作人员认为旋塞阀齿轮箱出现故障是一种正常现象。

3.2 设备设计和人为因素分析

（1）旋塞阀设计

Baton Rouge 炼油厂烷基化装置的 15 个旋塞阀，其齿轮箱支架均是使用相同型式的 4 个垂直螺栓，把旋塞阀承压顶盖和阀体固定在一起，如图 3 所示。但是，这种齿轮箱（30 多年前的设计）可以通过卸下那 2 个水平螺栓而拆除，不影响关键的承压顶盖螺栓。

根据 API 599 *Metal Plug Valves – Flanged, Threaded, and Welding Ends*（金属插入式阀门-法兰式、螺纹式和对焊式），具备安装致动器或齿轮操作功能的阀门，操作过程应能达到

不拆除任何（承压）部件（例如阀体螺栓、阀盖螺栓、法兰螺栓、填料螺栓、阀杆螺母等）的要求。

此次事故中涉及的旋塞阀齿轮箱满足标准要求，因为可以在不拆除任何承压部件的情况下拆除齿轮箱。操作人员本可以卸掉连接支架和齿轮箱的那 2 个水平螺栓（如图 5 中黄色箭头所示），而不应该卸掉固定旋塞阀承压顶盖的 4 个垂直螺栓。



图 5：事故涉及的旋塞阀的齿轮箱支架实图

CSB 调查组了解到，此类旋塞阀的生产商（Durco）于 1984 年对旋塞阀的设计进行了升级和更新，齿轮箱支架可以通过不同类型的螺栓连接与阀门固定在一起，不同于固定承压顶盖和阀体的螺栓连接方式。Baton Rouge 炼油厂烷基化装置中约 97% 的旋塞阀都是这种较新型的 Durco 旋塞阀设计。旋塞阀设计改善后，齿轮箱支架就不可能与承压顶盖连接在一起，从而防止此类事故发生。

控制等级的有效执行对于降低风险和预防重大事故至关重要。控制等级是一种评估安全保护措施（提供有效的风险降低）的方法。虽然 Baton Rouge 炼油厂使用的老式旋塞阀设计满足 API 599 的要求，从控制等级的概念上来看，将这些老式旋塞阀设计进行升级更新属于高级别的控制措施，可能就会避免此次事故的发生。这种老式设计忽视了 API 针对改善人为绩效



的安全指南提出的一个重要原则：使人方便做正确的事，不方便做错误的事。尽管这样，采取其他类型的控制措施，例如书面的操作规程和作业培训等，虽然在控制等级上较低，但对于预防类似事故的发生也很重要。

（2）设备设计的良好实践

作为一个重要的设备设计文献，Don Norman 博士编写的《*The Design of Everyday Things*（设计心理学）》已被 CCPS 初版的多本专业书籍引用，这些书籍为化工行业提供了重要的安全指导和参考，包括：

- *Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety*（过程安全人为错误预防指南）
- *Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents*（化工过程事故调查指南）
- *Plant Guidelines for Technical Management of Chemical Process Safety*（化工过程安全的技术管理指南）。

在《设计心理学》一书中，Don Norman 详细分析了三里岛核电站事故，描述了一次简单机械故障的错误判断如何导致了反应器破坏和美国核电工业的暂停。他还提到，外界舆论的责备主要集中在操作人员身上，认为人为失误是造成事故的直接原因，但是事故调查委员会发现该核电装置控制室的设计存在很多问题，人员发生操作失误是必然的。

在这本书中，Don Norman 解释了人与设备配合时为什么会发生问题和不期望的后果。他说，设计要考虑设备如何工作、如何被控制以及人与技术之间互动的本质。有很多原因会造成人机互动的缺陷，包括设备设计者对人的行为的不充分理解。Don Norman 还特别强调了如果设备设计没有充分考虑设备如何使用的话，可能带来的潜在问题和风险。人们通常会把设备设计缺陷造成的问题归咎于人为失误。

在 CCPS 出版的《*Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries*（过程工业领域改善绩效的人为因素方法）》中，提倡事故调查应避免把事故原因归咎于个人，而应该试图弄清楚导致事故发生的潜在原因，而潜在原因的根源通常是设计问题，包括：

- 设备设计；
- 作业设计；
- 作业环境设计。

人们通常习惯性认为人为失误是造成工业事故的共同原因，Don Norman 反对这种观点，他还进一步强调了好的设计对于预防事故的重要性，他认为：人为失误通常是设计缺陷造成的，应称之为系统失误。犯错是人类本性的一部分，系统设计时应该考虑到这一方面。

Baton Rouge 炼油厂烷基化装置火灾事故涉及的老式旋塞阀缺少固定齿轮箱的专用连接点，设计者只提供了承压顶盖的连接点，同时被用于固定齿轮箱的支架。正如此次事故的发生，拆卸支架可能导致高度危险物料的意外失控泄漏。

齿轮箱支架被固定在承压顶盖上，设计者在支架上预留了连接齿轮箱的额外连接点。对于阀门设计者来说，这看起来是一个完美的、合理的设计；但是对于操作人员来说，当为了打开阀门需要拆掉出现故障的齿轮箱时，支架看起来就像是齿轮箱本身的一部分。同时受到其他因素的影响，例如烷基化装置中这种设计的阀门很少、缺少培训和书面的操作规程，事故风险进一步增加了。

烷基化装置更多采用的这种新式旋塞阀是一种更好的设计。设计考虑了拆除齿轮箱总成时可能存在的危险化学品物料泄漏的风险，设计者额外提供了用于固定齿轮箱支架的 4 个连接点，而且连接位置不在承压部件上，如图 6 所示。采用这种新式设计的旋塞阀，如果作业人员完全拆除齿轮箱及其支架，管线内化学品物料也不会泄漏。

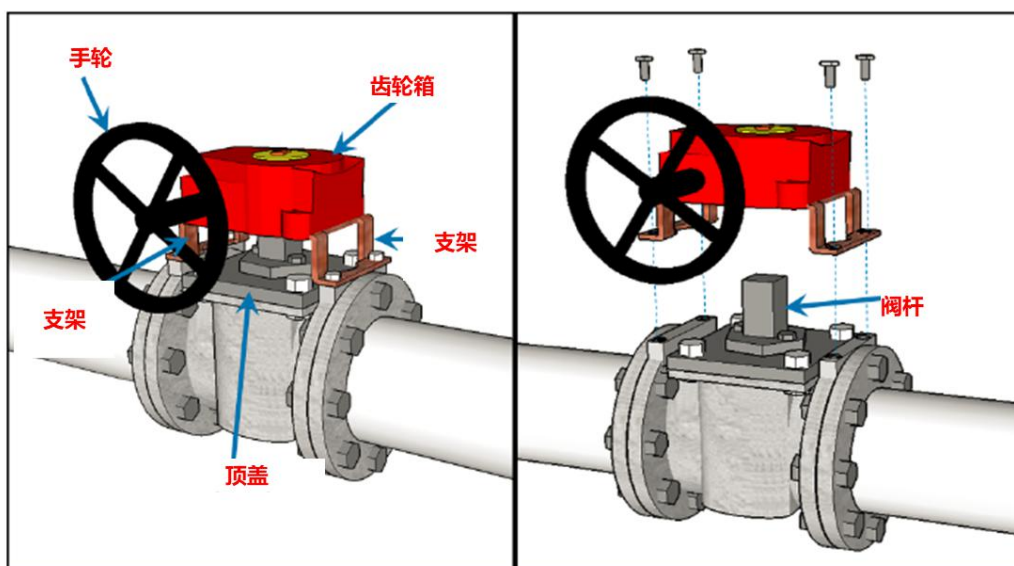


图 6：新式旋塞阀设计示意图

因此，CSB 调查组认为，设备设计缺陷是导致此次事故的一个重要因素。

(3) 人为因素



美国职业安全卫生署（OSHA）的过程安全管理标准（PSM 29 CFR 1910.119）要求企业对规定范围内的过程工艺进行详细的过程危害分析（PHA，Process Hazard Analysis），目的是识别、评估并控制工艺流程中涉及的风险。这种 PHA 包括人为因素评估。

美国石油协会（API）发布了一个人为因素评估工具，目的是改善过程危害分析中如何处理人为因素的方法。API 人为因素评估工具的范围“包括现有操作和人工作业”，例如拆除故障的旋塞阀齿轮箱。这一工具提供了一系列问题，其中人为因素方面的问题包括：

- 是否存在任何设备经常不能按照意图工作？
- 人为失误如何能导致事故或不安全的条件？
- 日常职责是否被合理定义？
- 作业辅助（包括培训）是否充足？

根据烷基化装置最新的 PHA 文件，PHA 没有考虑阀门操作有关的人为因素影响。如果在 PHA 分析过程中对老式旋塞阀齿轮箱的拆除作业进行了讨论，就可能发现齿轮箱拆除作业中存在的潜在风险，企业就能采取相应的更换或改造措施，从而避免事故的发生。

3.3 书面操作规程

当企业期望操作人员在没有专用操作规程的情况下进行作业，就会增加不期望事件发生的可能性。在进行类似现场作业之前，企业的过程安全管理体系应确保制定相应的操作规程，并通过进行风险评估识别和控制风险。CSB 调查组认为，详细的书面操作规程有助于确保作业活动的安全进行，作业风险得到有效控制。

正如此次事故的发生，说明在没有建立相应操作规程的情况下进行现场作业活动是很危险的。Baton Rouge 炼油厂本应该制定书面的操作规程，详细说明安全拆除旋塞阀齿轮箱的正确步骤和方法，就可能避免事故的发生。

3.4 培训

美国职业安全卫生署（OSHA）要求企业根据过程安全管理标准（PSM 29 CFR 1910.119），对工艺流程操作过程中涉及的每一位员工进行工艺概况和操作规程的培训，培训应包括特殊的安全和健康风险、应急操作（包括停车）和安全作业实践等。Baton Rouge 炼油厂向 CSB 调查组提供了大量的员工培训记录，但是，培训记录中没有发现有关如何从旋塞阀上拆除故



障齿轮箱的内容。

在旋塞阀产品文件中，Flowserve 警告使用者不要拆掉承压顶盖的螺栓。但是，这一信息没有传递给 Baton Rouge 炼油厂的作业人员。另外，Baton Rouge 炼油厂操作人员培训材料中，缺少有关拆除旋塞阀齿轮箱的潜在后果方面的信息。

CSB 调查组通过操作人员访谈和审查培训材料，认为埃克森美孚石油公司没有为烷基化装置操作人员提供充足的培训，使其具备安全地从旋塞阀承压顶盖上拆除齿轮箱的能力。

3.5 企业文化

在不具备详细的操作程序和安全作业培训的情况下，Baton Rouge 炼油厂允许烷基化装置操作人员拆卸出现故障的旋塞阀齿轮箱，再使用管钳手动旋转阀杆，埃克森美孚石油公司认为这是习惯做法。

此次事故暴露出来的企业文化问题包括：

- 长期存在的齿轮箱可靠性问题没有被调查，也没有被修正；
- 在不具备详细操作程序和安全作业培训的情况下，烷基化装置的操作人员有时遇到出现故障的齿轮箱问题，拆除齿轮箱后，然后使用管钳旋转阀杆打开或关闭该阀门。
- Baton Rouge 炼油厂人为因素分析没有识别并有效控制拆卸故障齿轮箱过程中存在的风险。

4. 事故启示

根据 Baton Rouge 炼油厂烷基化装置异丁烷泄漏和火灾事故的调查情况，CSB 调查组为化学品生产企业（包括炼油厂）总结的经验或启示如下：

（1）如果企业的机械设备或其他设备存在操作困难或可操作性问题时，特别是当该设备属于 PSM 标准范围内的工艺流程的一部分时，应对操作困难或可操作性问题涉及的人为因素进行评估。应用控制等级的策略降低或消除识别出来的风险。在此次事故中，Baton Rouge 炼油厂本应该意识到烷基化装置约 3% 的旋塞阀采用的齿轮箱连接设计可能导致承压部件的意外拆卸。如果识别出来，炼油厂应针对这些旋塞阀采用控制等级的思路制定相应的风险降低策略。



(2) 作业人员执行具有潜在风险的作业前，例如拆卸故障的齿轮箱，应为作业人员制定详细的、正确的操作规程。在此次事故中，应针对旋塞阀上的故障齿轮箱的拆卸作业，编制专门的操作规程。当存在不同类型的设备或配置，容易造成混淆时，编制操作规程更为重要。

(3) 为作业人员提供充足的培训，确保作业人员能够安全地执行预期的作业任务。这种培训应包括工艺和设备方面的重点，提高作业人员的风险意识，有助于预防事故的发生。

5. 安全提示

根据 Baton Rouge 炼油厂烷基化装置异丁烷泄漏和火灾事故的调查结论，CSB 调查组针对存在手动齿轮操作旋塞阀的化学生产企业（包括炼油厂）总结如下安全提示：

(1) 企业应针对装置内的阀门进行全面调研，识别出来采用齿轮操作方式的旋塞阀（齿轮箱支架与阀门承压部件连接）；

(2) 针对识别出来的齿轮操作旋塞阀进行危害分析和风险评估，采用控制等级的思路制定风险降低策略；

(3) 考虑将这些阀门更换为新式设计的阀门，把齿轮箱支架与阀门法兰连接固定，或以其他方式控制潜在风险；

(4) 针对后期计划进行升级更换的阀门，制定临时的风险降低方案，控制风险，保护作业人员；

(5) 提供书面的操作规程和培训，确保作业人员能够安全地从旋塞阀上拆卸齿轮箱；

(6) 考虑扩大调研范围，除了手动齿轮操作的旋塞阀以外，对可能与阀门承压部件连接的其他类型装置（例如电机或致动器）进行评估。

6. 参考文献

- [1] CSB Safety Bulletin, Key Lessons from the ExxonMobil Baton Rouge Refinery Isobutane Release and Fire. No. 2016-02-I-LA.
- [2] American Petroleum Institute (API). (2013). Metal Plug Valves - Flanged, Threaded, and Welding Ends: API Standard 599: Seventh Edition..
- [3] Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1994). Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety. New York: American Institute of Chemical Engineers (AIChE).
- [4] Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1995). Plant Guidelines for Technical Management of Chemical Process Safety. New York: American Institute of Chemical



中国石油和化学工业协会培训中心 期号：2017-10

天津市居安企业管理咨询有限公司

Engineers (AIChE).

- [5] Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2007). Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries. Hoboken: American Institute of Chemical Engineers (AIChE).
- [6] Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2012). Guidelines for Engineering Design for Process Safety, (Second ed.). New York, New York: American Institute of Chemical Engineers.

培训中心与居安咨询 2016 年起建立战略合作伙伴，双方在人才、技术、市场等方面搭建了安全一体化服务平台，综合双方在行业内领先的安全管理经验与安全技术水平，为我国石油和化工行业安全咨询提供服务。

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 或 zsxzrt@163.com。

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！

