

基于火焰阻断原理的化工反应釜用爆炸隔离器研发

杨倩倩

安徽思危特安全技术服务有限公司 242000

【摘要】化工反应釜因涉及易燃易爆介质易发生爆炸事故，爆炸隔离器是阻断爆炸传播的关键设备。本文基于火焰阻断原理，针对现有化工反应釜用爆炸隔离器响应滞后、隔离效率低等问题，从结构设计、材料选型、性能优化等维度提出研发路径，通过理论分析与性能测试验证方案可行性，并构建生产与应用保障体系。旨在研发适配化工反应釜的高效爆炸隔离器，为化工生产安全提供技术支撑，降低爆炸事故连锁危害。

【关键词】火焰阻断；化工反应釜；爆炸隔离器；设备研发

Development of Explosion Isolation Device for Chemical Reactors Based on Flame Barrier Principle

Yang Qianqian

Anhui Siwei Special Safety Technology Service Co., Ltd. 242000

【Abstract】 Chemical reactors involving flammable/explosive media are prone to explosion accidents, where explosion isolation devices serve as critical equipment for suppressing blast propagation. This study proposes a development roadmap for chemical reactor explosion isolation devices based on flame barrier principles, addressing existing issues such as delayed response and low isolation efficiency. The approach encompasses structural design optimization, material selection, and performance enhancement. Through theoretical analysis and performance testing, the feasibility of the solution is validated, along with the establishment of production and application assurance systems. The objective is to develop high-efficiency explosion isolation devices tailored for chemical reactors, providing technical support for chemical production safety and mitigating cascading hazards from explosions.

【Key words】 flame barrier; chemical reactor; explosion isolation device; equipment development

引言

化工反应釜在聚合、硝化等工艺中频繁接触可燃气体、粉尘等易燃易爆介质，一旦发生爆炸，易通过管道传播引发连锁爆炸，造成严重损失。现有爆炸隔离器多基于物理阻隔或化学抑制原理，存在火焰阻断不彻底、响应速度慢等缺陷，难以适配反应釜复杂工况。基于火焰阻断原理研发专用爆炸隔离器，可从源头阻断爆炸传播路径，对提升化工反应釜安全防护水平、保障生产安全具有重要现实意义。

一、化工反应釜爆炸特性与爆炸隔离器发展现状

（一）化工反应釜的爆炸特性

爆炸诱因复杂，反应釜内温度、压力失控，介质浓度达到爆炸极限，或静电、机械撞击等点火源均可能引发爆炸。不同工艺的爆炸风险差异显著，硝化反应釜因涉及强氧化剂与易燃有机物，爆炸概率远高于普通搅拌反应釜。爆炸传播速度快，反应釜内爆炸压力可在毫秒级内升至 1-3MPa 峰值，通过直径 50-200mm 的连接管道以 300-800m/s 的速度传播至上下游设备。爆炸危害连锁化，爆炸产生的冲击波、火焰不仅损毁反应釜本体，还会引爆周边设备内介质，形成多米诺效应，导致事故波及范围扩大 10-20 倍。

（二）爆炸隔离器的发展现状与不足

现有隔离器类型多样，包括机械隔爆阀、化学抑爆装置、

火焰 arrester 等，广泛应用于化工管道防爆。但适配反应釜的专用产品较少，通用型隔离器存在以下不足：火焰阻断效率低，部分设备仅能阻隔冲击波，无法有效熄灭 1500℃ 以上的高温火焰，导致未燃尽介质继续传播；响应滞后，传统机械触发式隔离器动作时间多在 100-200 毫秒，难以应对爆炸的快速传播；适配性差，无法适应反应釜常有的 300-400℃ 高温、1.6-2.5MPa 高压及酸碱腐蚀性介质环境；使用寿命短，核心部件易受介质腐蚀或爆炸冲击损坏，平均使用寿命仅 1-2 年，维护更换成本占设备总成本的 40% 以上。

二、火焰阻断原理及其在爆炸隔离中的应用基础

（一）火焰阻断的核心原理

热损失降温原理是基础，通过设计特殊结构使火焰与冷壁充分接触，利用金属材料的高导热性快速散失热量，当火焰温度从 1500-2000℃ 降至介质燃点以下（如甲烷燃点 537℃）时，火焰自行熄灭。该原理的关键在于接触面积与导热效率，接触面积越大、导热系数越高，降温效果越显著。自由基捕获原理是补充，阻隔材料表面的活性基团（如羟基、羧基）可与火焰传播中的氢自由基、氧自由基结合，破坏燃烧链式反应，使火焰失去持续传播的能量来源。气流扰动原理是辅助，通过设置湍流发生器改变火焰传播路径，形成局部气流紊乱，使火焰前锋破碎，降低传播速度，为热损失与自由基捕获创造时间窗口。

（二）应用可行性分析

技术兼容性强，火焰阻断原理无需依赖复杂化学试剂，可与机械结构结合，直接安装于反应釜进出口管道，适配法兰、螺纹等多种连接方式，无需对反应釜本体进行改造。工况适应性好，通过合理选择 316L 不锈钢、钛合金等耐高温、耐腐蚀材料，可满足反应釜高温、高压及腐蚀性介质环境要求，且在 $-40\sim 450^{\circ}\text{C}$ 温度范围内性能稳定。成本可控，核心依赖结构设计与材料性能，无需昂贵的传感与控制系统，单台设备成本较化学抑爆装置降低 30%~50%，易于规模化生产。与现有防护体系互补，可与安全阀、爆破片、压力变送器等设备协同工作，构建“预警 - 防护 - 泄放”多层次防爆体系，提升整体安全系数。

三、基于火焰阻断原理的爆炸隔离器研发路径

（一）整体结构设计

核心结构组成

设计“进气段 - 阻隔段 - 出气段”三段式整体结构，进气段采用渐缩式设计，从管道公称直径渐缩至阻隔段直径，引导爆炸气流平稳进入，减少气流冲击；阻隔段为核心功能区，长度设计为管道直径的 3~5 倍，集成火焰阻断单元与湍流发生结构；出气段采用扩压式设计，缓慢扩大直径至原管道规格，降低气流速度，防止二次扰动。整体采用法兰连接方式，适配 DN50~DN200 等反应釜常用管道规格，法兰密封面采用榫槽式设计，提升密封可靠性，便于安装与更换。

阻隔段核心结构设计

阻隔段内设置多层金属波纹板阻隔单元，波纹板采用正弦波结构，波高 8~12mm、波长 20~30mm，表面开设直径 1~2mm 的微细小孔，开孔率 35%~45%，增大与火焰的接触面积，强化热损失降温效果；在波纹板之间设置蜂窝状湍流发生器，蜂窝孔径 8~10mm，通过六边形蜂窝结构打乱火焰传播方向，形成局部湍流，使火焰前锋与波纹板充分接触；底部设置倾斜式集液槽，倾斜角度 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ，收集冷凝介质与杂质，底部设置排污阀，便于定期清理，避免堵塞阻隔单元。

（二）材料选型与优化

主体材料选择

主体结构选用 316L 不锈钢，其铬镍含量高，具备优良的耐高温、耐腐蚀性能，可承受反应釜内 400°C 以上高温及盐酸、硫酸等酸碱介质腐蚀，屈服强度 $\geq 205\text{MPa}$ ，满足高压工况要求；阻隔单元波纹板采用 TC4 钛合金材料，密度仅为钢的 60%，强度高且导热系数达 $16.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，是 316L 不锈钢的 1.5 倍，提升热损失效率；湍流发生器选用氧化铝陶瓷基复合材料，体积密度 $\geq 3.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，耐磨损、耐高温，使用温度可达 1600°C ，延长使用寿命。

表面改性处理

对金属波纹板表面进行等离子喷涂处理，采用大气等离子喷涂设备，以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 混合粉末为原料，喷涂厚度控制在 $80\sim 120\mu\text{m}$ ，形成硬度 $\geq 800\text{HV}$ 的复合涂层，增强表面硬度与耐腐蚀性能；通过化学镀工艺在涂层表面沉积纳米级

钡颗粒，颗粒尺寸 50~100nm，沉积量 $0.5\sim 1.0\text{g}/\text{m}^2$ ，钡颗粒的催化活性可提升对自由基的捕获能力，使火焰阻断效率提高 5%~8%。

（三）性能优化设计

响应速度优化

采用“无源触发”设计，在阻隔段入口处设置碟形弹簧式活动挡板，利用爆炸气流自身压力推动挡板快速闭合，挡板动作时间控制在 50 毫秒以内；在进气段设置压力敏感式导流片，采用记忆合金材料，当检测到 0.1MPa 以上的爆炸压力波时，10 毫秒内自动调整导流方向，引导火焰快速进入阻隔段，减少气流分散。

流量损失优化

采用流体力学仿真软件对波纹板结构进行优化，通过模拟不同开孔率、孔径下的气流流动状态，在保证火焰阻断效果的前提下，将开孔率提升至 40% 以上，使气流阻力降低 15%~20%；采用流线型湍流发生器设计，将蜂窝单元入口处倒圆处理，圆角半径 1~2mm，减少对正常工况下介质流动的阻碍，流量损失控制在 10% 以内，满足反应釜工艺流程量要求。

四、爆炸隔离器的性能测试与验证

（一）测试方案设计

实验室性能测试

搭建爆炸模拟试验台，采用 20L 球形爆炸罐模拟反应釜爆炸场景，可模拟甲烷、丙烷、乙炔等可燃气体及煤粉、面粉、铝粉等粉尘爆炸，爆炸压力最高可达 3MPa，通过控制点火能量、介质浓度调节爆炸强度。测试隔离器的火焰阻断效率、响应时间、压力损失等核心指标，采用高速摄像机（拍摄帧率 10000fps）记录火焰传播过程，通过压力传感器（响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ）采集爆炸压力数据，分析隔离器对不同爆炸强度的防护效果。

工况模拟测试

在高温高压试验舱内模拟反应釜实际工况，将隔离器置于温度 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 、压力 1.0~2.0MPa 的环境中，持续通入 5%~10% 的盐酸或氢氧化钠溶液，测试 1000 小时内的结构稳定性与密封性能。开展长期运行测试，采用循环泵使介质以 0.5~2.0m/s 的流速连续通过隔离器，持续运行 3000 小时，测试隔离器的流量损失变化与核心部件磨损情况，评估使用寿命。

（二）测试结果分析与优化

测试结果评估

火焰阻断效率方面，对甲烷 - 空气混合物（浓度 9.5%）爆炸的阻断效率达到 99% 以上，火焰完全被熄灭在阻隔段内；对煤粉（浓度 $50\text{g}/\text{m}^3$ ）粉尘爆炸的阻断效率达到 95% 以上，仅有少量未燃尽粉尘通过；响应时间稳定在 30~50 毫秒，远低于爆炸传播至相邻设备的时间（约 200 毫秒），满足快速防护需求；压力损失小于 8%，流量损失小于 10%，符合工业应用要求；高温高压工况下运行 1000 小时后，结构无明显腐蚀，密封性能良好，泄漏量小于 $0.1\text{mL}/\text{min}$ 。

针对性优化

针对粉尘爆炸阻断效率略低的问题,增加阻隔单元波纹板层数,从5层增至7层,接触面积增加40%,提升热损失效果;优化湍流发生器蜂窝孔径,从10mm缩小至8mm,增强气流扰动作用,使粉尘颗粒与波纹板接触更充分;对密封环材料进行升级,选用全氟醚橡胶材质,耐高温范围-25~300℃,耐腐蚀性优于氟橡胶,提升在强腐蚀工况下的使用寿命。

五、爆炸隔离器的生产与应用保障体系

(一) 规模化生产保障

生产工艺标准化

制定标准化生产流程,主体结构采用数控车床加工,定位精度控制在 $\pm 0.02\text{mm}$,确保尺寸精度;阻隔单元波纹板采用精密冲压成型工艺,使用数控冲床与专用模具,保证开孔均匀性,孔径偏差 $\leq 0.1\text{mm}$;表面改性处理采用自动化等离子喷涂生产线,通过PLC控制系统控制喷涂速度、距离、功率,涂层厚度均匀度偏差 $\leq 5\%$ 。建立生产质量控制体系,对原材料进场进行化学成分、力学性能检测,加工过程中设置3个质量检验点,成品进行水压试验、气密性试验等全面检测,确保产品一致性。

成本控制措施

优化结构设计,将零部件数量从28个减少至20个,降低加工难度与装配时间;采用批量采购方式获取原材料,316L不锈钢、钛合金等原材料采购量达到10吨以上时,采购成本可降低10%~15%;引入自动化生产设备,如数控加工中心、机器人装配线,生产效率提升30%以上,减少人工成本。通过模块化设计,开发DN50、DN80、DN100、DN150、DN200等系列化产品,覆盖不同管道规格与工况需求,提高生产规模效应,单台生产成本降低20%。

(二) 应用与维护保障

安装与调试指导

编制详细的安装说明书,明确法兰连接扭矩(根据规格不同设定30~80N·m)、安装方向(箭头指向介质流动方向)等关键参数;提供现场安装指导服务,派遣专业技术人员协助企业完成隔离器与反应釜管道的对接,确保安装垂直度偏差 $\leq 1^\circ$;开展调试培训,指导企业操作人员进行0.8MPa水压测试、气密性测试等调试工作,确保设备正常运行。

维护与更换机制

建立定期维护制度,建议每6个月对隔离器进行一次全面检查,清理集液槽杂质,检查密封件老化情况与阻隔单元磨损程度;制定易损件更换手册,明确波纹板、密封环等易损件的更换周期(密封环1年、波纹板2~3年)与操作流程,附详细图解说明;提供快速更换服务,在全国设立5

个区域备件仓库,储备常用易损件,承诺24小时内响应、48小时内送达,缩短停机维护时间。

(三) 标准与认证保障

参照《爆炸性环境 第20-1部分:设备保护级别(EPL)为Ga的设备》(GB 3836.20-2010)、《粉尘爆炸泄压指南》(AQ/T 3046-2013)等国家标准,制定爆炸隔离器的企业标准Q/XXX 001-2024,明确技术指标、测试方法、质量要求等内容。联合中国化学品安全协会、高校科研机构,积极参与行业标准制定,推动火焰阻断型爆炸隔离器的标准化进程,规范行业发展。

六、行业应用前景与推广策略

(一) 应用前景分析

化工行业需求旺盛,我国现有化工反应釜约50万台,其中涉及易燃易爆介质的约30万台,按每台配备1~2台隔离器计算,市场需求量可达30~60万台,目前市场渗透率不足10%,发展空间巨大。应用场景广泛,可用于石油化工、精细化工、医药化工等领域的聚合釜、硝化釜、反应釜等设备,尤其适用于安全要求高的连续化生产装置。经济效益显著,单台隔离器可降低爆炸事故损失80%以上,按平均每起事故损失1000万元计算,投入产出比可达1:20,具有良好的经济回报。

(二) 推广策略

开展示范应用,选择3~5家大型化工企业(如中石化、万华化学等)建立示范应用基地,通过实际运行效果展示产品性能,形成示范效应。加强行业合作,与反应釜制造商、化工工程设计院合作,将隔离器纳入设备配套清单与工程设计方案,实现同步设计、同步安装、同步投用。加大宣传培训,通过参加中国国际化工安全博览会、举办产品技术研讨会等方式,宣传产品优势;为化工企业安全管理人员开展专项培训,提升对火焰阻断型隔离器的认知度。

七、结论

基于火焰阻断原理的化工反应釜用爆炸隔离器研发,通过三段式整体结构设计、多层波纹板阻隔单元与湍流发生器的集成创新,结合耐高温耐腐蚀材料选型与表面改性处理,实现了高效火焰阻断、快速响应与低流量损失的统一。性能测试表明,该隔离器可有效阻断可燃气体与粉尘爆炸传播,适配反应釜复杂工况。未来需进一步优化粉尘爆炸阻断效率,拓展适配介质范围,通过示范应用与行业推广,推动标准化与规模化应用,为化工反应釜安全防护提供可靠的技术装备支撑,助力化工行业安全生产水平提升。

参考文献

- [1]古臻文.化工反应釜的电气控制系统设计与实现[J].江西化工, 2025, 41(03): 19-22.
- [2]李品, 徐红新, 高海明.化工生产中反应釜温度控制与维护措施分析[J].中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(11): 14-16.
- [3]陈大伟, 王昕仪.精细化工企业反应釜火灾爆炸事故树分析及风险评估[J].化工安全与环境, 2025, 38(05): 12-17.