催化剂跑损原因分析

高琳昊　刘建军　包学峰　刘晓佳
陕煤集团榆林化学有限责任公司　陕西　榆林　719000

摘　要：催化剂跑损是化工生产过程中的重要问题，直接影响生产效率和经济效益。本文系统分析了催化剂跑损的基本概念与类型，深入探讨了物理机械磨损和化学腐蚀反应两种主要跑损机理。研究从催化剂自身特性、工艺条件和设备操作三方面剖析跑损影响因素，并提出催化剂优化、工艺改进和设备升级等防治措施。通过多维度综合防控可有效降低催化剂跑损率，为化工生产稳定运行提供保障。

关键词：催化剂跑损；机理分析；影响因素；防治措施

引言：催化剂跑损现象普遍存在于化工生产过程中，其发生机理复杂多样。物理因素如流体冲刷和颗粒碰撞导致机械磨损，化学因素如活性组分流失和结构破坏引发化学腐蚀。跑损程度受催化剂物性、反应条件和操作参数共同影响。深入分析跑损原因并采取针对性措施，对维持催化剂活性、降低生产成本具有重要意义。

1 催化剂跑损的基本概念与类型

1.1 基本概念

催化剂跑损是指催化剂在生产、运输、储存及使用等过程中，因各种因素导致催化剂数量减少或性能下降的现象。这种损失会对化工生产等相关领域产生多方面的影响，不仅增加生产成本，还可能影响生产效率和产品质量。催化剂跑损具有多种特性。从跑损程度来看，可能表现为少量的逐渐损失，也可能是大量的突发损失。跑损方式也各不相同，有的是由于机械作用导致催化剂颗粒的磨损和脱落，有的是因为化学作用使催化剂的活性组分流失，还有的是在操作过程中由于工艺条件控制不当等原因造成催化剂的损失。了解这些特性对于分析催化剂跑损的原因和采取相应的预防措施具有重要意义。

1.2 跑损类型

1.2.1 按跑损发生的阶段分类

在生产阶段，催化剂的制备过程中可能会由于工艺参数控制不当、设备问题等原因导致跑损。例如，在催化剂的合成、成型等环节，如果温度、压力等条件不合适，可能会使催化剂的结构受到破坏，从而产生跑损。运输阶段，催化剂在运输过程中会受到振动、碰撞等作用，这可能导致催化剂颗粒的破碎和损失[1]。运输过程中的环境因素，如湿度、温度的变化等，也可能对催化剂产生影响，增加跑损的风险。使用过程中跑损是较为常见的类型。在化工反应过程中，催化剂长期处于复杂的工艺条件下，受到温度、压力、流体冲刷等多种因素的作用，容易发生跑损。例如，流体流速过快会对催化剂产生较强的冲刷作用，导致催化剂颗粒被携带跑损；反应温度过高可能会使催化剂的结构发生变化，使其更容易破碎和跑损。

1.2.2 按跑损的表现形式分类

机械磨损导致的跑损是由于催化剂在使用过程中与设备、其他颗粒等发生摩擦和碰撞，使催化剂颗粒逐渐磨损、变小，从而造成跑损。这种跑损形式在催化剂的使用过程中较为常见，尤其是在一些流体流动较快、颗粒之间相互作用较强的反应体系中。化学作用引起的跑损是指催化剂在接触到一些化学物质时，发生化学反应，导致催化剂的活性组分流失或催化剂的结构被破坏，从而引发跑损。例如，催化剂在接触到腐蚀性物质时，可能会发生腐蚀反应，使催化剂的性能下降，进而导致跑损。操作不当造成的跑损是由于操作人员在操作过程中没有按照正确的操作规程进行操作，导致工艺条件异常，从而使催化剂发生跑损。例如，在调整反应温度、压力等参数时，如果操作不当，可能会使催化剂受到过度的热冲击或压力波动，导致催化剂的结构破坏，产生跑损。

2 催化剂跑损的机理分析

2.1 物理机理

在催化剂跑损的物理机理中，机械力作用是一个重要因素。催化剂在反应器内运行时，会持续受到流体的冲刷作用。当流体在反应器内流动时，其产生的冲击力会不断作用于催化剂颗粒表面，长时间的冲刷可能使催化剂颗粒逐渐破碎。催化剂颗粒之间也会发生碰撞摩擦。在反应器内，催化剂颗粒处于运动状态，彼此之间的碰撞不可避免，这种碰撞摩擦会导致颗粒表面磨损，使颗粒变小，进而造成跑损。例如，在一些气固流化床

反应器中，高速流动的气体携带催化剂颗粒运动，颗粒之间以及颗粒与反应器壁的碰撞摩擦较为剧烈，容易引发催化剂的破碎和磨损跑损。流体携带也是导致催化剂跑损的重要物理机理。在反应过程中，产生的气流或液流具有一定的速度和携带能力[2]。当催化剂颗粒的粒径较小，或者由于机械磨损等原因产生了细小的颗粒时，这些细小颗粒就容易被气流或液流携带出去。例如，在催化裂化反应中，反应产生的高温气流速度较快，会将部分细小的催化剂颗粒携带到后续的设备中，从而造成跑损。流体的流速越高，其携带能力越强，越容易将更多的催化剂颗粒携带出去，增加跑损量。

2.2 化学机理

化学机理在催化剂跑损过程中起着不可忽视的作用。催化剂与反应物料之间的化学反应可能直接导致活性组分流失或结构破坏，从而引发跑损。反应物料中常含有一些具有腐蚀性或能与催化剂发生反应的成分，当催化剂与其接触时，可能发生化学作用，使活性组分转变成无催化活性的化合物并随物流流失。例如，在含硫体系中，硫可与金属活性组分反应生成硫化物，造成活性下降和催化剂损耗。这种化学作用不仅削弱了催化性能，还可能导致催化剂结构变得松散，增加其在物理力作用下的破碎风险。在高温、高压等苛刻条件下，催化剂还可能发生烧结和挥发等变化，进一步加剧跑损。高温环境下，催化剂颗粒表面原子获得足够能量，发生迁移和重排，使得孔结构坍塌、比表面积减少，这一过程称为烧结。烧结会降低催化剂的活性和机械强度，使其更容易破碎流失。此外，某些催化剂中的挥发性组分在高温下易逸出，导致组成改变和结构不稳定，进而影响催化性能并增加跑损的可能性。高压条件同样会对催化剂产生不利影响，促使化学反应加速，诱导活性组分流失或结构破坏。这些化学变化降低了催化剂的稳定性，使其在运行过程中更易发生损耗，影响反应效率和使用寿命。

3 催化剂跑损的影响因素

3.1 催化剂自身因素

催化剂的物理性质对其抗磨损能力和稳定性具有重要影响。颗粒大小是其中一项关键指标，颗粒过小的催化剂容易被反应介质带出系统，特别是在气相或液相流速较高的条件下，流失风险显著增加。颗粒形状同样不可忽视，表面不规则或棱角较多的颗粒更容易发生摩擦破损，从而导致细粉增多并随物料流出。强度和耐磨性则决定了催化剂在长期运行中是否能够保持结构完整，强度不足或脆性较大的催化剂在装填、运行过程中易碎裂，进而引发跑损问题。除物理性质外，催化剂的化学稳定性也是影响跑损的重要因素。活性组分的热稳定性和抗中毒能力直接关系到其在反应环境中的持久性。若活性组分在高温下容易迁移或挥发，则会导致催化性能下降并伴随部分物质的流失。此外，某些催化剂对特定杂质较为敏感，如含硫、含氯化合物可能引起不可逆中毒，破坏活性中心，降低催化效率的同时也可能诱发结构变化，从而加剧跑损现象。

3.2 工艺条件因素

反应过程中所采用的工艺参数对催化剂的运行状态有显著影响。温度是其中最为关键的因素之一，过高温度不仅会加速催化剂的烧结过程，使其孔隙结构塌陷、比表面积减少，还会促进活性组分的迁移和挥发，导致催化性能下降并伴随部分材料的流失。压力的变化也会对催化剂产生一定影响，尤其是在高压环境下，可能导致催化剂颗粒间的挤压和破碎，增加粉尘生成量。流体流速的变化对催化剂的冲刷作用尤为明显[3]。在高流速条件下，气体或液体对催化剂颗粒的冲击力增强，容易造成颗粒之间的碰撞和表面磨损，形成细粉并随物流带走。原料中若含有腐蚀性成分，会在催化剂表面发生化学侵蚀，破坏其骨架结构，降低机械强度，从而加剧跑损。杂质的存在也可能堵塞催化剂内部孔道，影响传质效率，导致局部反应集中，进一步加剧催化剂的失活和损耗。

3.3 设备与操作因素

反应器的设计对催化剂的运行环境起到决定性作用。反应器的几何形状、内部构件布置以及流体分布方式都会影响催化剂床层的受力情况。若反应器设计不合理，可能导致流体分布不均，形成局部高速区或涡流区域，使催化剂受到不均匀的冲刷和磨损，增加跑损风险。支撑结构若设计不当，也可能造成催化剂堆积不均或流动路径异常，影响整体运行稳定性。操作过程中的规范性同样不可忽视。在开停车阶段，若升温或降温速率控制不当，可能引发催化剂颗粒内外温差过大，导致热应力作用下的破裂。压力骤变也可能引发类似问题，使催化剂结构受损。催化剂装填方式若不规范，如装填密度过大或松紧不均，会影响床层的透气性和稳定性，在运行过程中容易出现沟流或塌陷，增加颗粒移动和流失的可能性。日常操作中若缺乏对运行参数的持续监控和调整，也可能在长时间运行中积累不利因素，最终导致催化剂的异常损耗。

4 催化剂跑损的防治措施

4.1 催化剂优化

改进催化剂的制备工艺是减少机械磨损跑损的重要手段。在催化剂制备过程中，通过优化制备流程和工艺参数，可以提高催化剂的强度和耐磨性。例如，在催化剂颗粒成型阶段，合理控制成型压力和温度，使催化剂颗粒具有更紧密的结构，从而提高其强度。采用先进的造粒技术，如喷雾干燥造粒，能够制备出粒径均匀、强度较高的催化剂颗粒，减少在反应器内受到流体冲刷和颗粒碰撞时的破碎和磨损。对催化剂进行表面处理，如涂覆一层耐磨层，也可以增强其耐磨性，降低机械磨损跑损的程度。优化催化剂的配方对于增强催化剂的化学稳定性、降低化学跑损可能性至关重要。在配方设计时，需要综合考虑催化剂活性组分与载体的相互作用，选择合适的活性组分和载体材料。例如，选择化学稳定性好的活性组分，减少在反应过程中与物料发生化学反应而流失的可能性。合理调整活性组分的负载量，避免因负载量过高而导致活性组分在高温、高压等条件下发生烧结或挥发。此外，添加一些助剂可以改善催化剂的化学性质，提高其抗中毒能力和稳定性，从而减少化学跑损。

4.2 工艺条件优化

合理选择反应温度、压力、流速等工艺参数是避免因工艺条件不当导致催化剂跑损的关键。反应温度过高会使催化剂活性组分发生烧结，导致催化剂结构破坏，从而引起跑损。需要根据反应的特点和催化剂的性能，确定适宜的反应温度范围，避免温度过高。反应压力的选择也需要兼顾反应速率和催化剂的稳定性，过高的压力可能会增加催化剂颗粒之间的碰撞力，导致机械磨损跑损增加。流速过快会增加流体对催化剂的冲刷力，使细小的催化剂颗粒更容易被携带出去，造成跑损。需要根据反应器的结构和催化剂的性质，合理控制流速，确保流体对催化剂的冲刷力在合理范围内[4]。对反应物料进行预处理是减少对催化剂腐蚀和污染的有效措施。反应物料中含有的腐蚀性物质和杂质会加速催化剂的化学跑损和性能下降。例如，物料中的酸性物质会腐蚀催化剂的活性组分，导致其流失；杂质可能会堵塞催化剂的孔道，影响反应物与催化剂的接触，进而导致催化剂跑损。在反应前，需要对物料进行净化处理，去除其中的腐蚀性物质和杂质。可以采用过滤、吸附、中和等方法对物料进行预处理，确保物料的纯度和性质符合反应要求，从而减少对催化剂的不良影响，降低跑损风险。

4.3 设备与操作优化

在反应器设计中，流体分布均匀性至关重要。在设计过程中，应注重流体分布的均匀性，防止因局部流速过高或流动不均造成催化剂过度冲刷或堆积。例如，在气固流化床反应器中，合理设置分布板的孔径与分布方式，有助于实现气体均匀分布，降低局部高速区的形成概率。通过优化反应器形状和内部构件布局，如加设挡板或导流装置，可有效引导流体平稳流动，减轻对催化剂的冲击作用。支撑结构的设计也应确保催化剂床层均匀稳定，避免出现空隙或局部堆积现象，从而减少跑损风险。规范操作流程和加强人员培训同样是控制催化剂跑损的重要环节。应制定明确的操作规程，涵盖开停车、催化剂装填及工艺参数调整等关键步骤。操作过程中，需严格控制温度和压力的变化速率，避免因骤升或骤降引发催化剂颗粒的热应力破裂。装填催化剂时，应采用科学方法保证床层均匀密实，防止因填充不均导致运行中颗粒移动流失。加强对操作人员的培训，提升其对催化剂性能和设备操作要求的理解与执行能力，有助于从管理层面降低人为因素造成的催化剂损耗。

结束语

催化剂跑损问题涉及多方面因素，从催化剂自身特性到工艺条件、设备与操作等，均会对催化剂的跑损产生影响。通过深入分析跑损机理和影响因素，提出了一系列针对性的防治措施，包括催化剂优化、工艺条件优化以及设备与操作优化等。在实际生产中，应综合考虑这些因素，采取有效的措施来减少催化剂跑损，提高化工生产的效率和质量，降低生产成本，实现可持续发展。

参考文献

[1]周庆祥.催化裂化装置催化剂自然跑损增大原因分析及对策[J].齐鲁石油化工,2024,52(4):315-320.

[2]姬勇,刘俊平,李鹏,等.某催化裂化装置催化剂破碎跑损诊断分析[J].炼油技术与工程,2024,54(8):56-59,64.

[3]文鹏,严超宇,魏耀东.催化裂化装置沉降器跑剂原因分析及对策[J].炼油技术与工程,2023,53(7):32-35.

[4]朱继红.催化裂化装置再生器旋分料腿断裂原因分析及对策[J].石油化工建设,2023,45(10):120-123.