

应用烧结金属过滤介质的过滤技术进展

Kenneth L. Rubow, Louise Stange and Billy Huang (Mott公司,美国)

摘要:介绍了使用烧结金属过滤介质的过滤技术的进展情况。内容涉及过滤器的设计及其性能测试,介质选择以及烧结金属过滤介质过滤器的应用实例。

关键词:烧结金属过滤介质,过滤技术,过滤器设计,性能测试,应用

中图分类号: TF125.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-7093(2005)09-0023-07

利用烧结金属介质的过滤技术为颗粒物从气体或液体中分离提供了杰出的工作性能(例如液-固和气-固分离),该技术被大量地应用于工业气体和液体过滤。烧结金属介质由金属纤维或粉末制成过滤元件,被广泛应用于化学工业、石油化工和电力工业。如为了产品的分离或满足环保要求,生产中需要分离颗粒物以保护下游工序的设备。

烧结金属介质过滤器为下游的工序提供了有效的屏障。该介质具有高的除尘效率,可靠的过滤性能,有效的反冲洗性和长期的在线服务能力。烧结金属介质过滤器的粒子捕获效率达99.9%,若使用表面或深层介质则效率会更高。依据选择的金属合金,操作温度可高达1000。除了考虑过滤效率外,同等重要的技术标准还包括抗腐蚀性、操作温度下的机械强度、沉积物的排放(自清能力)和在线工作寿命,上述因素对于实现成功有效的运行十分重要。

该过滤介质的寿命(即过滤器运行寿命)依赖其捕获粒子的能力和相应的压力降。通过反冲洗循环系统尘饼能被定期去除。反冲洗循环系统和过滤器压降回复的效率是集尘和过滤介质性能的一个决定性功能。在光滑的过滤器中成形的深层过滤介质适用于低粒子负载的场合。

除了在单一过程中提供优越的过滤外,可在线

反冲洗介质还减少了操作者暴露在加工物料和挥发性排放物下的时间,同时还能在高温和腐蚀环境下应用。任何高操作成本的以压力驱动的过滤工艺都有使用烧结金属过滤技术的潜力。

本文将讨论烧结多孔金属介质过滤器的操作参数和过滤系统的设计标准,以优化一些化工流程的性能。

21世纪给化学工业带来了许多经济和环境方面的挑战。变化的主要推动力包括市场全球化,改善环境的需求,利润率、生产率和改变生产力的要求。未来化学加工工业的竞争优势将是来自专利技术和技术诀窍。随着环境影响和能源效率的提高,新的经济性高产量和高质量工艺的特点将是许多工业化生产装置都具有好的环境保护能力和高的能效。

很多化工产品和工艺都包含固体(颗粒)处理过程。过滤技术提供了一种通过机械分离(借助于专利设计的过滤器和独特的运行系统)减少固体颗粒的方法。过滤能提高产品的纯度,增加生产能力,减少污染物的排放(尽量减少或防止对水和空气的污染),并为过滤器下游的贵重设备提供保护。过滤技术的进步包括以连续工艺代替陈旧的间歇工艺技术。成本节省包括有害排放物的减少和由于新技术而带来的劳动力节省。全自动的过滤系统能与工厂的工艺控制相结合。

固体减少包括清除工艺废液和清洗溶剂中的

收稿日期:2004-10-19

悬浮颗粒。回收的液体可被循环用作其他进料。废弃物的最小化包括回收或再循环中有害固体物质和丢弃至垃圾处理场无害物质的减少。过滤能减少废水中的 BOD (生物耗氧量)、COD (化学耗氧量)、TSS (总悬浮颗粒) 和 TOC (总有机碳), 根据国内外的标准, 上述指标是目前排放物测量的主要参数。

1 过滤的基本原则

过滤的基本原则主要是确保过滤介质的合理设计, 特有介质的最佳选择和为每一种过滤应用设计过滤器。可以考虑两种主要的过滤方式, 如深层过滤和表层过滤。深层过滤时粒子是在介质中被捕获, 而表层过滤是粒子被截留在表面上, 最后形成尘饼。

表层过滤主要是一个粗滤 (过筛) 的装置, 将过滤器表层前面的粒径大于过滤介质孔径的粒子分离掉, 阻止大粒径粒子进入或通过气孔。后来的粒子积累形成尘饼, 随着更多的粒子流进入过滤介质, 尘饼增厚。尘饼良好的较小的孔径结构使其分离的粒子比过滤介质分离的粒子更细, 但是尘饼在过滤过程中必须有足够多的孔以允许连续的气流通过。操作可以在压力增加的连续流动或压力降低的连续流动下进行。因为大多数的表层过滤器不是十分光滑或没有很均匀的孔径结构, 会发生一些深层过滤, 因而将会影响过滤器的寿命。

深层过滤主要用于微小粒子的分离上, 例如保护下游的设备不被阻塞和腐蚀, 保护催化剂不中毒和产品提纯。粒子进入介质中, 随后被其多层结构所捕获。该多层结构阻止了介质的过早阻塞, 并增加了介质容纳污物的能力和在线寿命。因为粒子在介质的深层被捕获, 所以需要进行离线清洗。离线清洗可通过溶剂、超声波振动、高温分解、水蒸气清洗或用循环水清洗来完成。介质可以打褶, 这是将空间尺寸和成本降到最低的一种构形。

了解过滤器去除气流中粒子的能力是过滤器成功设计和运行的关键。对于载有少量粒状杂质的流体采用内部多孔介质捕获粒子的方法过滤是高效获得粒子的关键。烧结金属的结构提供了一

个曲折的路径, 可在其内部将粒子捕获。捕获的粒子在介质表面形成尘饼, 新捕获的粒子在以前沉积的粒子之上。这类过滤器的寿命取决于其容污能力和相应的压降。对于载有大量粒子的流体, 现行的过滤设备是滤饼过滤。生成的滤饼超过了过滤元件, 变成过滤层并产生附加的压降。压降随着负载粒子的增加而增加。一旦在过滤循环中达到最终的压力, 过滤器就用洁净的气体反吹或冲洗掉滤饼。如果过滤介质的孔径选择正确, 介质的压降能被恢复到初始压降。但是, 如果粒子在前面的流动中沉积在多孔介质内部, 并逐渐充填, 那么过滤器的压降在清洗循环之后可能不会完全回复。

过滤比率受到喂入粒子浓度、粘度和温度因素的影响。过滤器运行模式可以是恒定压力, 恒定流动率, 或是过滤过程中压力上升而流动率下降。如果粒子很快阻塞达到压力极限, 或是尘饼过滤的容尘已满, 即使没有达到极限压力, 过滤循环都会被终止。渗透性用相对于压降的流动率来表示, 受到过滤器类型、流体温度和固体载量的影响。

1.1 烧结金属粉末介质

烧结金属介质通过把金属粉末压成多孔薄片或管状物制成, 然后再用高温烧结。具有代表性的烧结金属粉末介质的扫描电子显微镜照片见图 1。粉末细度、压制和烧结操作综合因素决定了孔的尺寸和分布、多孔组件的强度和渗透性。烧结金属介质的孔径用 ASTM E-128 来测定。介质等级的确定相当于孔的平均水平或过滤器孔的平均尺寸。烧结金属介质有几个等级, 0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、40 和 100。介质等级在 0.2 ~ 20 的过滤级别,

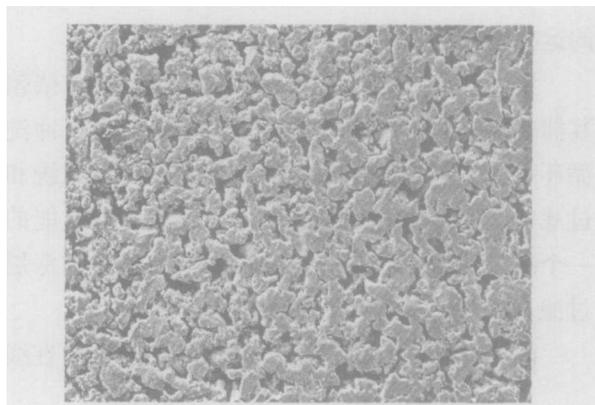


图 1 烧结金属粉末介质的显微镜照片

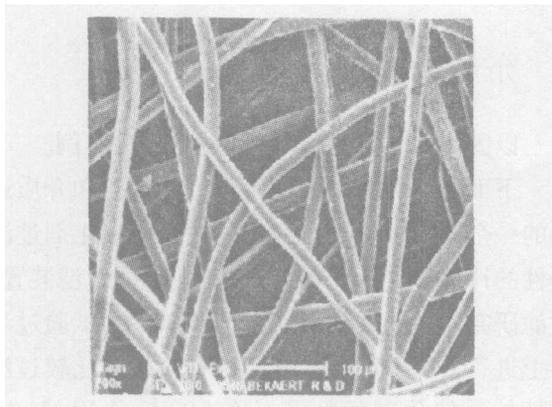


图2 金属纤维介质的显微镜照片
液体过滤等级是绝对值为 $1.4 \sim 35 \mu\text{m}$, 气体过滤等级为 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

由薄片或管状物构成的滤筒是一个全焊接结构。设计和制成的过滤介质是稳定的多孔基体,具有精确的始沸点特性、精密的厚度偏差和均匀的渗透性,因而可确保可靠的过滤性能、高效的反冲洗性和长时间的在线服务寿命。

1.2 烧结金属纤维介质

金属纤维过滤介质由很细的金属丝 ($1.5 \sim 80 \mu\text{m}$) 均匀地铺放,形成三维的非织造布结构并在连接点进行烧结构成的,具有代表性的烧结金属纤维过滤介质的扫描电子显微镜照片见图2。这些介质是专门为表层或深层过滤器而设计的。利用每一层由不同直径的纤维构成的单层或多层复合的结构来实现最佳的工作性能,例如压降、过滤效率、粒子负载能力和介质强度。多层复合材料采用分级设计,因此容污的能力更高,寿命期望值也 longer。过滤器最终等级由使用的每层介质的面密度及其纤维组成,以及层与层的结合状况来决定。高孔隙率结构(达85%)可提供非常高的渗透性,因而压降很低。

由各种金属合金构成的金属纤维过滤器特性,对于气体过滤允许在高温、高压和有腐蚀性气体等极端的情况下使用。烧结金属过滤器的基本优点是:强度大,断裂韧性好,耐高温、高压,抗高热冲击,耐腐蚀,易清洁,全焊接组装和工作寿命长。

金属纤维介质比金属粉末介质拥有更高的孔隙率,因此导致较低的压降。对于在高温或腐蚀性的环境中的应用,Bekaert已经研究出了除 AISI 316L 以外的新合金纤维。Inconel 601 和 FeCrAlloy

两种产品被应用于高温场合(分别高达560和1000),而合金HR可以耐高达600的温度和潮湿的腐蚀环境。

金属过滤器的内在韧性保证了连续的反脉冲运行,延长周期。对于高温应用领域需要添加另外的标准,如蠕变疲劳作用和高温腐蚀机件。半永久性介质的过滤器性价比高,因为该过滤器的停机时间最短,能用最少的人员进行停车和自动操作,且极少维修。

过滤介质的合理选择,包括合适的孔径、强度和耐腐蚀性,使其能在粒子滞留下长期地高效运行。液体的过滤等级是绝对值在 $2 \sim 35 \mu\text{m}$ 之间,气体的过滤等级是 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间。

2 过滤器设计

液固分离的过滤器设计是选择能提供符合要求的过滤,最小程度的反冲洗或喷吹以及最大的产量。三种类型的过滤器结构描述如下:

(1) 从外向内过滤:传统液固隔板分离发生在封闭端管式过滤器部件的外部边界(LSP)。已证实充有气体的水脉冲反冲洗是清洗烧结多孔金属过滤器最有效的方法。

(2) 从内向外过滤:液固隔板分离发生在封闭端管式过滤器部件的里面(LSI)。LSI的反冲洗型式有全程反冲洗、空壳反冲洗、空壳和空的湿尘饼反冲洗、空壳卸除湿尘饼。

(3) 从内向外多级过滤:液固隔板式流动分离发生在开放式的管状过滤器元件(LSM和LSX)的内部。元件密封在两个管状薄片里,因而允许从顶部或底部进料。LSM过滤器拥有进料再循环的特点,已经在几个连续的密封反应器系统得到证明。向下的速率控制着催化剂尘饼的厚度,速率越低尘饼越厚。过滤器反冲洗模式与LSI反冲洗模式相似,也包括碰撞和凝聚式的反冲洗,允许固体物质在过滤器的元件或壳体内不排尽。连续的密封反应器系统可以不要反冲洗。

过滤系统的能力要考虑到高流速和固体含量增加的需要。过滤单元适合于间歇或连续工艺。在流速允许,并且在反冲洗前的几分钟内即可停止

流动,或者可以进行离线维护的工艺,建议采用单室的过滤系统;对于需要连续流动和只允许短时间离线维护的工艺,建议采用两个过滤器的双重系统;对于即使在维护阶段也可连续运行的工艺,建议采用三个过滤器的系统。

3 实验室试验和中间试验

估计过滤器性能的有效方法是通过实验室试验和中间试验。过滤器测试通常采用一个简单的圆盘式可行性试验来考核介质和获得主要的过滤性能。成功的可行性研究通常进行更进一步的中间试验装置的试验。中间试验有助于研发可付诸实施的工业化分离工艺。

在实验室试验提供可靠的过滤器性能指标的同时,在中试生产线上测试获得的数据将显示正常工艺变化下的过滤器运行参数。研发程序要求在扩大阶段直接使用适合的设备。可反冲洗烧结合金属过滤器的中间试验可以提供如下信息:

- (1)考核过滤质量;
- (2)在不同流率下每一周期过滤器的处理量;
- (3)压降的上升率与处理量的关系;
- (4)反冲洗容积和产生的固体浓度;
- (5)为最大规模装置按比例放大数据;
- (6)精确的成本估算;
- (7)论证高的产品价值;
- (8)运行可靠,长时间在线工作,维修少;
- (9)在工业化规模上论证新技术。

除了确定过滤器的性能外,中间试验还为操作工程师提供了学习使用设备和对于特殊工艺进行过滤器最优化操作实验的机会。中间试验在完全工业化之前还存在重要的技术问题和难题。中试运行结果表明:

- (1)过滤 反应的研究结果在实验室和中试装置上得到证明;
- (2)论证新技术;
- (3)自始至终回收大量产品;
- (4)最优化的产品分离和回收;
- (5)完成生产能力测试;
- (6)综合运行效率高。

4 介质选择

以固体催化剂分离作为可行性研究案例。

下面的研究案例说明了可行性试验和介质选择的一个典型方法。目的是通过对新催化剂过滤特性的评价来支持现有的 LSI工业化的过滤装置。过滤研究在一个直径为 70 mm 圆盘式的试验过滤器上进行,使用 5 级和 10 级两种介质来比较过滤器性能。催化剂的粒径分布 (PSD)使用 Horiba LA-910 激光分散粒子粒径分布分析仪来测定。平均粒径为 13.4 μm 的粒径变化范围 (根据体积分数)是 0.51 ~ 60 μm。图 3 是放大 2 000 倍的粒径分布 SEM 照片。

催化剂浆料一旦以恒定的速度通过装有 5 级和 10 级介质的直径为 70 mm 的圆盘式过滤器 (图 4)时,浆料喂入样品和过滤 (5 级)样品的粒径分布比较如图 5 所示。测试表明,使用 5 级介质过滤比使用 10 级介质过滤产生的升压低,如图 6 所示。混浊样品的过滤结果相似。5 级介质过滤测得为 2.9 NTU,而 10 级介质为 2.3 NTU。厚 3.2 mm 的

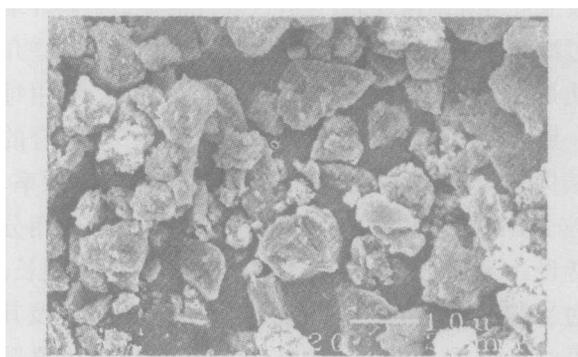


图 3 催化剂的 SEM 照片

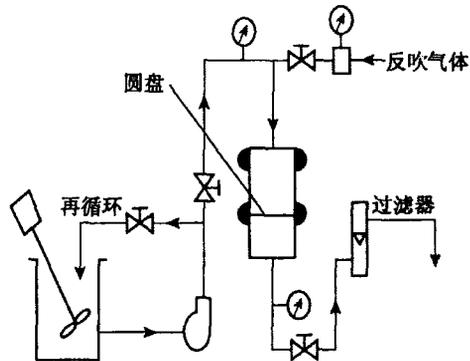


图 4 圆盘式可行性试验示意

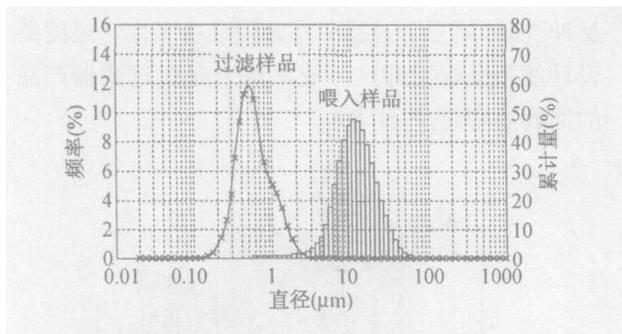
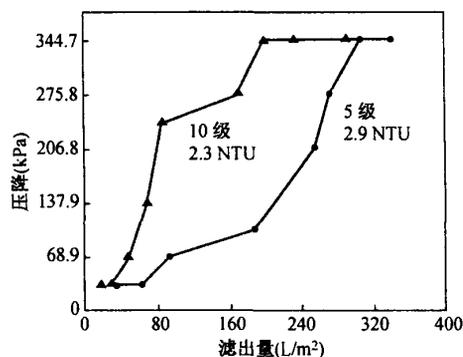


图5 喂入样品和过滤样品的粒径分布



滤饼厚 3.2 mm, 平均流量 = 2.7 g/(min·m²)

图6 压降升高比较

滤饼从 5 级介质表面被有效反冲洗。一些催化剂仍滞留在 10 级介质的多孔结构中, 表明催化剂阻塞了一些表面气孔。

测试结果表明, 使用 HyPulse LSI 过滤器构形时, 5 级介质更适合新催化剂样品的过滤。工业化中间试验证实了可行性研究的结果, 并为现有过滤器购买更换的滤芯。

5 工业化应用实例

5.1 应用 1

在 1992 年 4 月进行的实验室圆盘式试验表明了烧结金属过滤器适用于催化剂的回收。实验室规模试验过滤器试验是在用户的实验室设备上进行的, 验证了过滤器的性能和过滤质量。1992 年 11 月采用 2% 浆料连续催化剂过滤的中间试验显示出始终如一的流量 2.2 g/(min·m²)。中试试验的圆盘式测试中得出的过滤器性能对比如表 1 所示。通过过滤器的轴向速率控制尘饼厚度。通过过滤器的速度或速率在实验室规模试验中达到

了最佳化。最佳的过滤器性能表明过滤器在压力小于 69 kPa 时运行不需要反冲洗。试验时间超过 1 500 h, 无重大变化, 试验一直进行到结束。

表 1 操作性能比较

项 目	圆盘式 试 验	实验室 试 验	工业化中试
介质等级	2	0.5	0.5
流速 [g/(min·m ²)]	4.4	2.2	1.8(-30%/+50%)
终压 (kPa)	27.6	41.4	27.6
滤液浊度 (NTU)	0.3	0.1	0.04

注: 设计流速。

中试研发计划的目标是将异构化从间歇工艺改造为连续工艺。第一家工业化装置按计划已在 1994 年运行, 在 1994 年 7 月开车, 其制定的工艺参数与中试参数一致。开车阶段的系统动力学和最初的运行情况与中试研究相似。在进行溶剂洗涤和每批从流程中移走 10% 催化剂之后, 过滤器成功地实现了贵金属催化剂回收和再循环的操作。然而, 工艺液体是有危险性的, 因为过滤系统是全封闭的, 用溶剂进行洗涤且回用的催化剂浆料会返回至反应器。

最初的 (较大的) LSM 催化剂过滤器被设计成用于大量催化剂的过滤和再循环。该过滤器设计是全封闭的自动操作, 过滤器清洗 换热操作极少。每批都加入新鲜的催化剂。较小的 LSP 过滤器是为了从系统中移走催化剂而设计的。在运行 7 年之后, 过滤器组在一次预防性维修保养中被取代。自从 1994 年安装以后, 过滤系统一直在运行。

5.2 应用 2

催化剂过滤的构想在实验室试验中得到验证, 并确定了过滤器运行参数和介质选择。利用中试装置进行的一个研发项目使用了装有可以从催化剂中分离产品的过滤反应器, 产品可以从反应器中移走, 而催化剂仍被保留, 因此允许进行半连续或连续反应。试验使用的是 HyPulse LSM 过滤器设计。

给反应器配备一个贮存催化剂的容器, 反应物能被抽出而不含产品的催化剂可连续移出。当催化剂失活时, 氢化过程停止。更好的过滤方法是在

反应器上安装一个可重复循环的回路,如图 7 所示。持续生产的间歇工艺或连续工艺都需要使用大量的催化剂,以充分保证工业化大生产的产量。该工艺可使总的循环时间减少 50%,增产超过 65%,如表 2 所示。

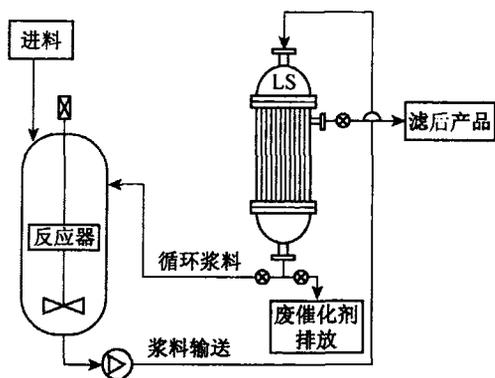


图 7 HyPulse LSM 过滤器再循环系统
表 2 新技术与标准工艺的比较

项目	标准工艺	新技术
负载时间 (h)	1	1 (8 倍的催化剂用量)
反应时间 (h)	2	16 (8 次合计)
冷却时间 (h)	1	1
过滤时间 (h)	-	1
每批的总循环时间 (h)	5	
8 批合计时间 (h)	40	19

5.3 应用 3

1985 年首次在油浆的连续过滤中使用了采用从内向外 (LSI) HyPulse 过滤技术的烧结金属过滤器。该装置证明了烧结金属介质适用于为改进碳纤维工艺使用的油浆高温过滤。过滤器成功运行多年,生产了固体含量少于 20×10^{-6} 的洁净油料,后来因产品需求少而被关闭。此后,全世界的炼油厂都认识到在油浆运转中采用烧结金属介质过滤去除催化剂细粒的好处。

20 世纪 90 年代许多 LSI 过滤系统被安装用于流化催化裂化 (FCC) 工艺中油浆的过滤。最大的连续过滤系统使用 (3) 66 LSI 过滤器,如图 8 所示。在 207 kPa 和 414 kPa 操作压力下,过滤周期 2~16 h,分别过滤含固量 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的油浆。通过同时运行的两个过滤器来获得更长的循环周期,但是循环时间是不确定的,当其中一个过滤单元被

反冲洗时,第三个过滤单元必须准备工作。过滤器设计使用全程反冲洗。使用两个在线过滤器产品的回收效率超过 99.8%。

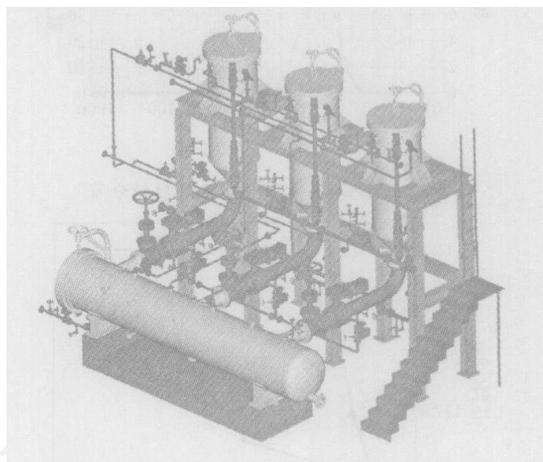


图 8 三重过滤系统示意

自 1997 年以来,中国已经有许多炼油厂安装了 LSI 过滤系统,用于渣油流化催化裂化 (RFCC) 单元去除催化剂。使用 (2) 24 LSI 过滤器的过滤系统被安装在一个年生产能力 140 万 t 的 RFCC 单元上,每天的油浆输出量为 180 t,油浆的平均固体浓度为 $3\,000 \times 10^{-6} \sim 5\,000 \times 10^{-6}$,循环时间 2~8 h 不等,滤液固体含量少于 50×10^{-6} 。过滤器由 PLC 控制,与炼油厂的控制系统 (DCS) 相连接,操作者可在控制室内监视过滤进程。该系统一直在连续运行,为当地公司提供洁净的滤液用来生产碳黑。

5.4 应用 4

一项生产二氧化铀的工艺采用了 HyPulse 气/固文丘里脉冲 (GSV) 反吹的烧结金属过滤器 (图 9),用于在烘干工序中回收二氧化铀细粒。该烧结金属过滤器必须能耐炉中 149 的高温气流,并能耐气体中的化学组分。与该反应相关的问题是主要存在化学性危险和放射性。反应过程使用强酸和强碱,使二氧化铀溶解,可能导致铀的吸入,并且腐蚀性的化学品存在引起火灾或爆炸的危险。

成功应用的领域和实验室提供的工况数据促成了在 1984 年第一个工业化过滤器的安装和投入运行。全封闭的 GSV 过滤器运行效率高,达 99.999%,固体负载很低,且很少反冲洗。主要的

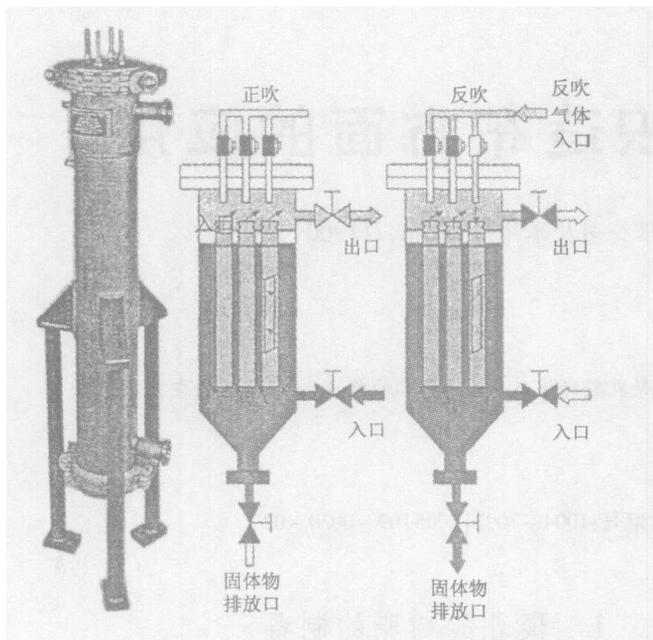


图9 GSV过滤器照片和原理示意
运行参数包括过滤器控制达到的流速、高效率 and 为连续运行使用反吹的流量。如今美国一家使用该专利技术的钕冶炼厂仍在继续运行。

5.5 应用 5

末道工序对除尘效率有更高的要求,洁净的烧结金属纤维过滤器为该工序提供了经济的解决方法。金属纤维过滤介质的发展(例如 Bekipor)通过较高过滤效率和更长的在线寿命有助于产品质量提高。传统的分离系统如旋风除尘器、静电除尘器(ESP)和一次性过滤器都失去了对人们的吸引力。

多孔结构是烧结金属纤维介质的特点,即使在高过滤速率下也会提供高的渗透性和低的压降。投资少,运行成本低。在线清洗表层过滤和离线清洗深层过滤的清洁度都很好。

人们已使用 Bekiflow HG来去除氧化铝和氢氧化铝粉尘,该粉尘中50%的粒子粒径小于 $15\mu\text{m}$ 。测得气体温度为 450°C 。过滤器入口粉尘浓度为

$250\sim 800\text{ mg}/\text{Nm}^3$,过滤后气体含尘浓度小于 $30\text{ mg}/\text{Nm}^3$,最大压降是 1.5 kPa ,过滤器的总表面积 830 m^2 。金属纤维过滤器只产生有限的压降,经测试保证 $27\,000\text{ h}$ 的使用寿命。用户可获得的好处是更少的过滤器表面、较小的除尘袋和更小的安装空间。

6 结语

烧结金属介质为去除微粒提供了一种有效的过滤方法,无论这些微粒是化工流程中的杂质还是有价值的副产品。这些介质十分适合于要求更高的应用领域,包括高温、高压和(或)腐蚀性流体场合。化工公司正在利用过滤在源头即把废弃物减至最少,而不是在生产线的末端。在化学产品生产,过滤提高了产品质量并保护了下游的设备。过滤技术的进步包括用连续的工艺代替老的间歇工艺技术的发展。使用传统的板式过滤器进行液/固相过滤是很脏的,清洗存在危险,并且要求延长再循环时间来获得洁净的产品。传统的气/固分离系统,例如旋风除尘器、ESP和一次性过滤器正在被烧结金属过滤系统所取代。

烧结金属过滤器应该在设计参数下运行,以防止由于工艺操作的波动而过早出现介质堵塞。使用流量控制可确保过滤器不受大的流量偏差的影响。随着过滤器上尘饼的形成过滤器效率提高。尘饼成为过滤介质,并且多孔介质作为隔膜来挡住过滤器尘饼。过滤尘饼可以在原位有效地清洗和从过滤器套筒内反冲洗。气压水脉冲帮助气体反吹已被证明是烧结多孔金属过滤器最有效的清洗方法。烧结金属过滤器可全自动控制,从而避免了操作者直接接触物料,减少了劳动力成本,同时为可靠、高效的过滤操作创造条件。

Advances in Filtration Technology Using Sintered Metal Filters

Kenneth L. Rubow, Louise Stange and Billy Huang (Mott Corporation, USA)

Abstract: The developing situations of filtration technology utilizing sintered metal media was introduced. The filtration system design and test of its performances were discussed in the paper, selection of media and real illustrations of application of filter with sintered metal media were presented as well.

Keywords: sintered metal media, filtration technology, design for filtration elements, test of performance, application