

文章编号:1673-5005(2006)06-0098-04

高温高压旋风分离器的性能及其应用

孙国刚, 李双权, 杨淑霞, 王洪英, 时铭显

(中国石油大学 过程装备实验室, 北京 102249)

摘要:以工业应用成熟的PV型高效旋风分离器为基础,从改善分离器的强度入手,对PV型分离器顶部及进气口等部位的结构进行改造,提出了一种拱顶、直切入口、升气管偏心的新型旋风分离器。介绍了新型分离器与PV型的冷模对比性能试验、分离效率与压降计算及其在粉煤灰熔聚流化床气化、聚丙烯聚合反应装置中的应用。结果表明,新型分离器结构强度和分离性能优良,适合在高温、高压工况下应用。

关键词:旋风分离器; 结构强度; 分离性能; 高温; 高压; PV型

中图分类号:TQ 051 **文献标识码:**A

Performance and application of a cyclone at high temperature and high pressure

SUN Guo-gang, LI Shuang-quan, YANG Shu-xia, WANG Hong-ying, SHI Ming-xian

(Process Equipment Laboratory in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the maturely applied PV type high efficiency cyclone technology, the top and entrance structures of the PV type cyclone were amended, and a new-type cyclone with vault top, eccentric vortex finder and straight cut-in round inlet was put forward. The contrast tests, calculations of the efficiency and pressure drop of the new cyclone and new-cyclone applications for the dedust of the fluidized gasifier for high temperature coal gas and the polypropylene reactor for high pressure off-gas were presented. Results show that the new cyclone is good in both strength and separation performance, being applicable at high temperature and high pressure conditions.

Key words: cyclone; structural strength; separation performance; high temperature; high pressure; PV type

高温高压气体的净化是石油、化工、冶金、能源等生产过程中的一个重要问题,国内外一直在进行研究^[1-3]。旋风分离器因其结构简单、无运动部件、成本低、效率高且阻力适中等优点,已成为高温高压气体净化的首选设备。常见的旋风分离器一般多采用平顶板和矩形入口,这使其在高温、高压下工作时,在直角连接等处产生很高的局部应力和变形,很难保证设备的机械强度和刚度,严重影响设备系统的正常运行和分离器工艺性能的发挥。对此,目前常用的处理方法是在角接处进行局部加强,如采用加强筋保护角焊缝。然而这种角焊缝加强的效果难以进行计算,工程上只能凭经验进行设计。笔者针对这一情况,综合考虑高温、高压工况下使用的旋风

分离器的工艺性能和机械强度要求,以时铭显院士主持开发的PV型高效旋风分离器^[4]为基础,对其入口和顶部结构进行改造,使其适用于高温、高压工况,并采用冷模对比试验考核改造后分离器的性能。

1 高温、高压旋风分离器的结构设计

由于设备材质、热膨胀等问题,高温旋风分离器一般都希望结构简单,以便于衬里等。PV型就是这样一种结构简单而高效的旋风分离器,已在全国石油催化裂化装置中广泛应用。图1为石油催化裂化装置中广泛应用的PV型高效旋风分离器基本结构。分离器顶部为简单的平顶板,升气管置于筒体轴心,含尘气体入口为蜗壳式矩形入口,角焊缝用筋

收稿日期:2006-09-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB221201)

作者简介:孙国刚(1961-),男(汉族),安徽天长人,教授,博士,博士生导师,主要从事气固分离技术和流态化工程方面的研究。

板加强。石油催化裂化装置中旋风分离器的工作条件是温度小于 750 ℃、表压力小于 0.3 MPa。若将 PV 型高效分离器推广应用于粉煤流化床气化、石油化工等过程中更高温度和压力的气体净化处理,为保证分离器的设备强度,降低或消除接头应力集中及保证焊接质量,尚须对现有 PV 型的结构再作一些修改,以适应高温、高压工况对设备强度的要求。

因此,对图 1 的 PV 型分离器作以下局部修改:① 将平顶板修改为压力容器封头式拱顶型,如椭圆封头拱顶,取消加强筋板;② 将蜗壳式矩形入口修改为直切式圆型(或椭圆型入口),消除直角接头。经上述修改后的新型分离器结构见图 2,它具有压力容器式的外形结构。显然它比图 1 的分离器具有更好的机械强度,更加适用于高温高压气体的净化处理,而且设备的金属用量也低于图 1 中的分离器。

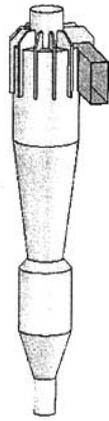


图 1 PV 型旋风分离器

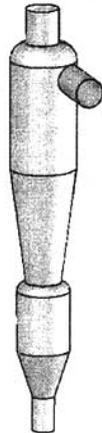


图 2 拱顶型旋风分离器

2 冷模对比试验

为测定拱顶型旋风分离器的性能,在实验室内进行了该分离器和 PV 型分离器的冷模性能对比试验。所对比的两类旋风分离器主体尺寸完全相同。模型分离器筒体直径 $\Phi 300$ mm,筒体与进气口截面面积比 $K_A = 5.5$,排气管与筒体直径比 $\bar{d}_r = 0.3$ 。对比基准的 PV 型分离器为平顶板、升气管中置、180°蜗壳矩形进气口。试验粉料为滑石粉,密度为 2700 kg/m³,中位粒径为 10 μ m。试验在常温、常压下进行,试验装置及试验方法参见文献[5]。

图 3 为椭圆封头拱顶、升气管中置、直切圆形入口的分离器与 PV 型分离器的效率对比。图中清楚地显示,相同操作条件下,椭圆拱顶、直切入口的分离器效率比 PV 型要低约两个百分点,说明上述以改善设备强度为目标的结构修改结果牺牲了分离器的效率,没有实现机械强度性能与工艺性能两个目标的统一,这必将影响它的应用。由此,应设法弥补

这些结构修改所造成的分离效率损失。

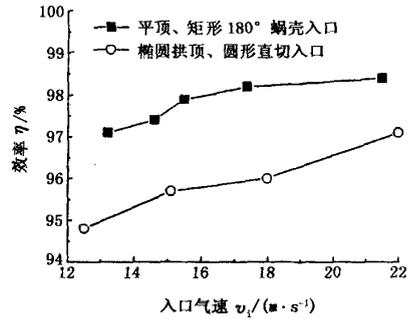


图 3 拱顶型分离器与 PV 型效率对比

从新分离器对 PV 型的结构修改不难发现,造成新分离器效率大幅降低的原因主要来自“顶灰环”增加和旋转中心与设备几何中心严重偏离两方面。将分离器平顶板改为拱顶后,分离器顶部的环流量加大,更多的气体作环流流动,携带更多的粉尘到拱顶,增加了“顶灰环”尘量。为减小“顶灰环”的影响,在椭圆封头拱顶内部增设一层与进气口上部平齐的平板(简称吊顶),这一吊顶板可以承受压力载荷,可以使用衬里将拱顶内部衬平等手段来实现。图 4 为椭圆拱顶冷模分离器吊顶前后的分离效率与基准的 PV 型对比。可见,吊顶这一措施很有效,吊顶后效率有较大提高,但分离效率仍然未达到 PV 型的高度,这需进一步考虑进气口直接切入和进口管形状方面的原因。将蜗壳进口缩变为直切进口,将导致进口流速与回转半周后的旋转速度间差距进一步加大,加剧气流旋转中心与旋风筒几何中心的偏离,降低气流旋转质量并增加了进口处的冲刷。进口管形状从扁窄的矩形变为圆形,在进气口面积相同的情况下,圆形进口管的中心更加靠近旋风筒轴心,使进口气流的旋转半径减小,从而影响分离效果。

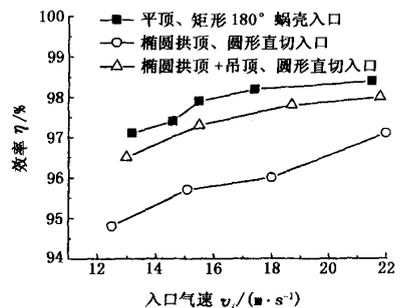


图 4 拱顶分离器吊顶前后的效率与 PV 型比较

将升气管偏离旋风筒轴心,即升气管偏置,可以显著地减少气流旋转中心与分离器设备几何中心间的偏离,从而明显地改善分离性能。文献[6]曾详细考察过升气管偏置方向、偏置距离、升气管直径等参数对分离器效率及压降的影响,结果表明升气管偏置,不但能使分离效率明显提高,而且还使分离器的阻力总体上有所下降,是提高旋风分离器性能的有效措施。图5为升气管偏置后的效率与PV型的比较。图5表明,将升气管偏置于某合适的位置,新的拱顶直切入口的分离器的分离效率可全面超过PV型。在图5试验范围内,升气管偏置、圆形直切入口的拱顶分离器效率比相同入口气速条件下的PV型约高0.2%~0.4%。由于所对比的PV型效率已很高(98%左右),试验用的滑石粉很细(平均粒径只有10 μm),有这样的效率提高是很难的。图6为新的圆形直切入口拱顶型分离器压降和PV型的对比。总体上看,新的结构修改对分离器压降影响不大。升气管偏置后,拱顶型分离器的压降还有所降低。

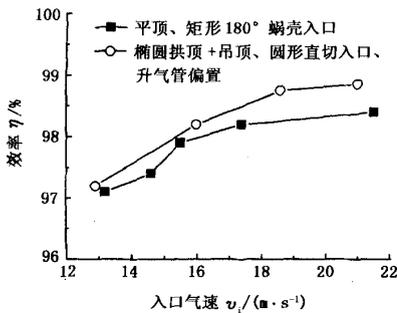


图5 升气管偏置后的效率与PV型比较

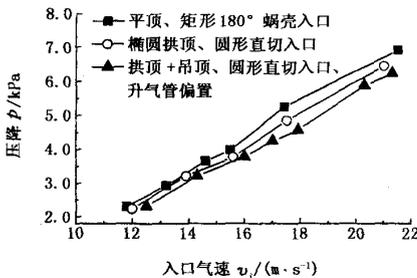


图6 拱顶型分离器压降与PV型对比

综上所述,在现有PV型高效旋风分离器的基础上,通过对其顶部、进气口及升气管位置等部位进行局部改造,得到了一种既具有较理想的结构强度,又具有较好的分离性能、适用于高温、高压工况的新型旋风分离器。其结构特征是具有压力容器式外壳结构,顶部为封头式拱顶、拱顶内部吊顶衬平,升气

管偏离旋风筒轴心,进气管直接切入,简称为拱顶偏心式旋风分离器。

3 分离性能计算

新开发的旋风分离器要成功地应用到工业中,必须能对其分离性能进行计算。PV型旋风分离器的技术核心是其独创的旋风分离器尺寸分类优化组合设计理论和一套包含众多影响因素的分离器性能计算方法。凭借这套设计方法,不但可以进行不同物料、各种操作条件的单级分离器的设计,也可以进行多级串联分离器的优化组合设计,改变了以往凭经验粗估设计的落后局面。拱顶偏心式分离器是在PV型分离器基础上进行局部结构改进获得的,因此,将PV型的效率与压降计算式^[7-8]作适当修正便可得到新分离器的效率和压降计算式。

3.1 粒级效率

粒级效率表达式为

$$\eta_i(d_p) = \begin{cases} 1 - \exp(-4.633\psi^{1.29}\tilde{C}_r^x), & \psi > 0.9; \\ 1 - \exp(-4.527\psi^{1.05}\tilde{C}_r^x), & 0.6 \leq \psi \leq 0.9; \\ 1 - \exp(-14.908\psi\tilde{C}_r^x), & \psi < 0.6. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\psi = f(St, Re, Fr, D_d, D_t, \tilde{d}_r),$$

$$\Phi = f(St, Re, Fr, \frac{d_p}{D}, \tilde{d}_r), \tilde{C}_r = C_i/C_{i0},$$

$$C_{i0} = 10 \text{ g/m}^3, x = f(\tilde{C}_i);$$

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 v_i}{18\mu D}, Re = \frac{\rho_g v_i D}{K_\Lambda d_r \mu},$$

$$Fr = \frac{g H_s K_\Lambda^2}{v_i^2}, D_d = \frac{d_p}{d_m}, D_t = \frac{d_m}{D},$$

$$K_\Lambda = \frac{\pi D^2}{4ab}, \tilde{d}_r = \frac{d_r}{D}.$$

式中, ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; d_p 为颗粒直径, m ; d_m 为入口颗粒平均粒径, m ; ρ_g 为入口气体密度, kg/m^3 ; v_i 为分离器入口气速, m/s ; μ 为气体粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; D 为分离器筒径, m ; H_s 为分离空间高度与筒径 D 之比; g 为重力加速度, m/s^2 。

3.2 总效率

总效率表达式为

$$\eta = \sum_{i=1}^n f_i(d_p) \eta_i(d_p). \quad (2)$$

式中, $f_i(d_p)$ 为入口粒径分布; $\eta_i(d_p)$ 为 d_p 粒子的粒级效率。

3.3 压降

压降表达式为

$$\Delta p = \zeta_i \rho_g \frac{v_i^2}{2} \quad (3)$$

其中

$$\zeta_i = 15.84 K_A^{-0.83} \bar{d}_r^{-1.74} D^{0.2}$$

式中, ζ_i 为入口阻力系数。

式(1)~(3)的计算结果与冷模试验数据吻合很好。

4 工业应用

新的拱顶分离器已经成功地用于灰熔聚常压流化床煤气化炉高温煤气和高压聚丙烯聚合反应气的除尘净化处理,均获得了良好的工业应用效果。

我国第一套灰熔聚常压流化床煤气化炉工业示范装置于2000年在陕西城固开车成功。旋风分离器的操作条件为:进口煤气温度850~900℃,表压力0.02 MPa,气量12.74 m³/s,颗粒浓度45~175 g/m³。采用本研究的两台直径1200 mm的旋风分离器串联,两级分离器总压降5 kPa,总效率大于99.5%。至今已近6 a,这两台分离器一直保持着良好的分离性能,也未出现强度问题。目前另有天津碱厂8×10⁴ t合成氨、平顶山煤业集团8×10⁴ t合成氨煤气化炉采用了两级Φ2080拱顶型旋风分离器,并投入了工业应用。

20×10⁴ t/a聚丙烯反应器旋风分离器的进口操作条件为:进口气体温度58.8℃,表压力2.21 MPa,气量1.03 m³/s。设计采用一台直切椭圆进口的椭圆顶旋风分离器,压降小于35 kPa,对气流中夹带的小于50 μm的聚丙烯细粒子的分离效率为99.95%。本研究的直切进口拱顶型分离器现已应用于我国石化系统中(7~30)×10⁴ t/a不同规模的聚丙烯生产装置,替代了国外进口的旋风分离器。

5 结论

(1)将平顶、180℃蜗壳矩形入口的PV型旋风分离器改为椭圆封头拱顶、直切式圆形入口,在本文的对比试验条件下,分离器的效率降低了约2%。在拱顶内吊衬平板后,分离器效率迅速回升,但仍低于平顶、矩形蜗壳入口的PV型。

(2)拱顶内吊顶、直切圆入口的分离器,升气管适当偏置后效率超过所对比的PV型约0.2%~0.4%。升气管偏置是提高分离效率的有效措施。

(3)在PV型基础上开发的新型拱顶升气管偏

置式旋风分离器,既有良好的机械强度,又有优秀的分离性能。

参考文献:

- [1] 夏兴祥. 高温除尘技术综述[J]. 化工机械, 2000, 27(1): 47-52.
XIA Xing-xiang. Review of the high temperature dust-removing technology[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2000, 27(1): 47-52.
- [2] SHIN M, KIM H, JANG D, et al. A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25: 1821-1835.
- [3] 李文琦, 陈建义. 旋风分离器高温性能试验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 97-100.
LI Wen-qi, CHEN Jian-yi. Experimental research of cyclone performance at high temperature[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(3): 97-100.
- [4] SHI Ming-xian, SUN Guo-gang, WANG Yun-ying, et al. Optimum design of cyclone separators [C]//6th World Filtration Congress. Nagoya: 1993: 7a-153.
- [5] 孙国刚, 李双权, 时铭显. PX型高效旋风分离器的研究开发[J]. 炼油技术与工程, 2006, 30(6): 30-34.
SUN Guo-gang, LI Shuang-quan, SHI Ming-xian. Development of PX type high-efficiency cyclone [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2006, 30(6): 30-34.
- [6] 李双权, 孙国刚, 时铭显. 排气管偏置对PV型旋风分离器性能影响的研究[J]. 石油炼制与化工, 2006, 37(5): 45-48.
LI Shuang-quan, SUN Guo-gang, SHI Ming-xian. Influences of excentric vortex finder on the PVTM cyclone performance[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2006, 37(5): 45-48.
- [7] 金有海, 陈建义, 时铭显. PV型旋风分离器捕集效率计算方法的研究[J]. 石油学报: 石油加工, 1995, 11(2): 93-99.
JIN You-hai, CHEN Jian-yi, SHI Ming-xian. Computation method of PV type cyclone performance[J]. Acta Petroli Sinica (Petroleum Processing Section), 1995, 11(2): 93-99.
- [8] SUN Guo-gang, CHEN Jian-yi, SHI Ming-xian. Optimization and applications of reverse-flow cyclones [J]. China Particuology, 2006, 3(1-2): 43-46.

(编辑 沈玉英)