

旋风分离器结构优化实验研究

刘秀林^{1,2*}, 陈建义², 姜淑凤¹, 陈淑鑫¹, 王兴国¹

(1. 齐齐哈尔大学, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要:为了在降低旋风分离器压降的同时维持较高的分离效率,设计了一种新型旋风分离器。采用弧形导流板分隔进气的入口结构、渐扩型排气的出口结构、加长型的筒体和锥体的结构,有锥顶过渡段的灰斗结构,并匹配了合理的尺寸。为了验证新型分离器的性能,将新型结构的旋风分离器与基准PV型分离器进行了并联对比实验。以空气为实验介质,实验粉料为滑石粉,在入口气速为14.2~21.2 m/s、入口含尘浓度为0.01 kg/m³时,同时测量了新型分离器与PV型分离器的效率和压降。对比实验结果表明,相对于基准PV型分离器,新型旋风分离器的平均压降降低了21.91%,且分离效率基本保持不变。

关键词:旋风分离器;渐扩型排气管;结构优化;压降;分离效率

中图分类号:TE969

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)12-0205-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.12.043

Experimental study on optimization of structure of cyclone separator

LIU Xiu-lin^{1,2*}, CHEN Jian-yi², JIANG Shu-feng¹, CHEN Shu-xin¹, WANG Xing-guo¹

(1. Qiqihar University, Qiqihar 161006, China; 2. China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to maintain high separation efficiency while reducing the pressure drop of cyclone separator, a new cyclone separator is designed, which has a new inlet structure with arc guide plate to separate the feeding gas, an gradually expanded outlet structure for discharging gas, an extended cylinder with a structure of cone, a new dust hopper structure with cone transition section and well-matched appropriate size. To verify its separation performance, the comparative tests are performed between the new separator and a standard PV cyclone separator. The experiments measuring their efficiencies and pressure drop are conducted by using air as medium and talcum powder as test dust, with an inlet air velocity of 14.2–21.2 m·s⁻¹ under a fixed dust concentration of 0.01 kg·m⁻³. Experimental results show that the pressure drop of new cyclone separator is 21.91% less than that of standard PV cyclone separator, while the efficiencies of both separators are approximately equal.

Key words: cyclone separator; gradually expanding exhaust pipe; optimization of structure; pressure drop; separation efficiency

旋风分离器是常用的气固分离设备。随着对节能减排的更深层次与更广泛的追求,设计一款能够大幅度降低分离器压降的新型旋风分离器有着非常重要的工业意义。

然而,目前对分离器的改进研究难以做到在降低压降的同时维持较高的分离效率。本文中设计了一种新型旋风分离器,在保持高效率的同时大幅度地降低能耗,为开发新型旋风分离器及推广工业应用提供了指导。

1 新型旋风分离器的结构方案设计

旋风分离器的设计首先必须要解决选型的问题。由于在现有的绝大部分炼油厂FCC装置上采用的是高效PV型旋风分离器^[1-2],并且设计和应用较为成熟,性能的计算方法也较为完善,因此本文中

选为新型分离器设计和对比试验的基准。

对于入口结构,根据时铭显等^[3]提出的PV型旋风分离器的设计方法,设计为矩形截面;为增加颗粒在分离器内的停留时间,设计为270°蜗壳形式。并根据祝立萍^[4]设计的进口弧形导向板,能够降低分离器的阻力损失;Lim等^[5]在切流入口增加了一块挡板,内侧引入洁净气流,提升分离器效率;沈恒根等^[6]设计了对称180°蜗壳双进口的分离器,能够增加旋流的对称性和稳定性,提升分离器效率;得出本文中入口结构改进的思路:在蜗壳式旋风分离器入口中间增加1块隔板,把入口气流分割成2个部分,并且保证隔板按照一定的包角与分离器筒体相切,以增加进气的对称性和旋流的稳定性。

对于排气管结构,下口直径比 \bar{d}_r 对效率和压降有着双重影响,因此是分离器所有结构中最重要

收稿日期:2018-12-13;修回日期:2019-10-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(11803013);黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(135209230)

作者简介:刘秀林(1990-),男,博士生,助教,研究方向为过程流体机械,通讯联系人,18810987535@163.com。

参数之一,为了达到大幅度减阻的目的,必须从排气管结构入手。根据 PV 型旋风分离器的设计方法^[3-7],设计了一种渐扩型的排气管,这种排气管包含了渐扩段和直筒段。在渐扩段,气流出口面积会不断增大,因此排气管中内旋流的整体速度就会不断减小,这样整体的出口静压就会不断增大,进而部分减小了气流在分离器内部的动能损失而减小了分离器内部的整体压降。同时,为了进一步降低分离器压降,可以稍微增大 \bar{d}_r ^[8]。

对于分离器筒体及锥体高度,钱付平等^[9]发现适当地增加分离空间高度能够延长颗粒在分离器内部的停留时间,并且增加自然旋风长度,使被卷吸到内旋流的颗粒再次分离,所以能够提升整体的分离效率。但是当增加到一定高度时,效率增加则不再明显。因此,本文中设计为加长型的筒锥结构,并且由于排气管设计部分设计了加长型的分流型排气管,也必须设计加长型的筒锥结构与之匹配。

对于灰斗结构,徐俊等^[10]将灰斗的水平顶盖改为了锥形过渡段,能够消除灰斗中的顶部灰环,提高效率。王成等^[11]发现灰斗也存在最佳直径和最佳高度,对分离效率有一定的影响。因此,本文中设计了含特定尺寸的带锥形过渡段的灰斗结构。

故新型分离器的各个关键结构的具体形式如表 1 所示。

表 1 新型分离器主要结构形式

	基准 PV 型	新型
进气方式	切流式	切流式
入口结构	单矩形入口,180°蜗壳,内侧与筒体相交	单矩形入口中间加隔板,270°蜗壳内侧与筒体相切
排气管结构	直筒型	渐扩型
筒体、锥体结构	较短	加长型筒体和锥体
灰斗结构	平顶灰斗	顶部有锥形过渡段

确定完新型旋风分离器的大体结构形式以后,在基准 PV 型旋风分离器的基础上,将以上 4 个部分进行组合,就构成了新型分离器。表 2 列出了基准 PV 型分离器与新型结构具体尺寸。

表 2 2 种分离器的主要尺寸

参数	基准 PV 型	新型
分离器直径 D/mm	600	600
入口高度 a/mm	352	326

入口宽度 b/mm	146	140
入口截面比 K_A	5.5	5.5
排气管直径比 $d_r^{\%}$	0.32	0.35
插入深度 S/mm	352	440
入口蜗壳 $\gamma/(\text{°})$	180	270
筒体高度 H_1/mm	840	1860
锥体高度 H_2/mm	1320	1200
排尘口直径 d_c/mm	240	240
灰斗内径 H_b/mm	440	440
灰斗高度 D_b/mm	1100	1100

最终,根据各个表中的具体数值,设计出了新型旋风分离器,如图 1 所示。

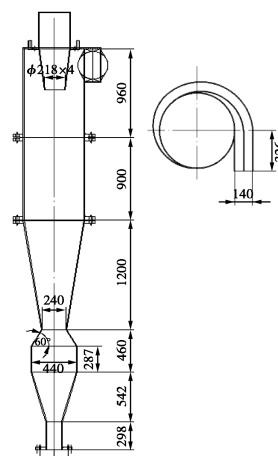


图 1 Φ600 新型分离器

2 实验装置建立、实验内容及方法

2.1 实验装置

为了研究不同结构旋风分离器的分离效果,本文中采用新型结构旋风分离器与基准 PV 型旋风分离器的对比试验方法。

并且,为了排除各种操作参数和粉料物性参数的影响,本实验安排在操作条件完全相同时,用同一种粉料在同一时间完成 2 种分离器的对比实验。

按照以上要求,设计了实验的流程,如图 2 所示,主要由通风系统、加料系统、旋风分离器模型和测试仪器仪表组成。

2.2 实验参数测量方法

为研究新型结构旋风分离器分离性能,采用滑石粉做单相颗粒的分离试验。实验采用常温负压操作,实验气体介质为空气,测量并比较滑石粉在固定入口浓度 10 g/m^3 ,入口风速分别为 14.2、17.1、19.3、21.2 m/s 时的分离效率和压降值。

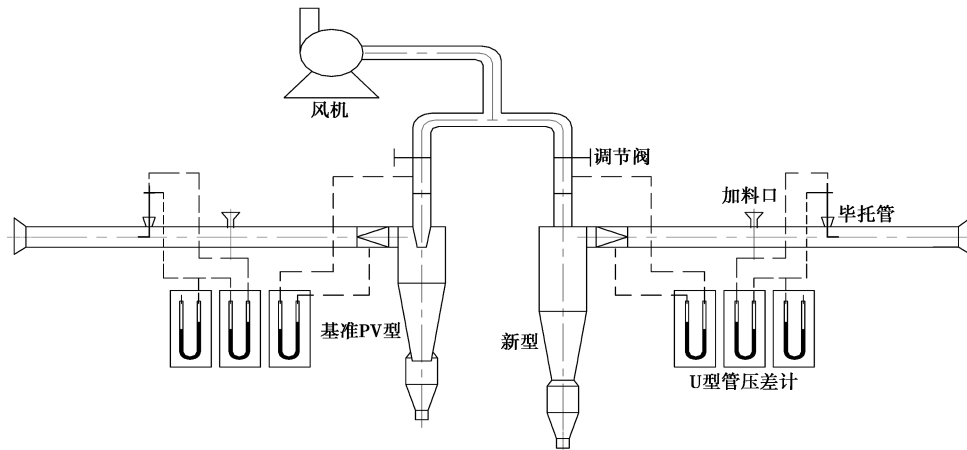


图 2 实验系统流程

滑石粉颗粒的形状是不规则非球形。用比重瓶测其颗粒密度为 $2\,780\text{ kg/m}^3$ 。用 Eyetech 激光粒形粒度仪测定其球形度为 0.76, 中位径为 $12.5\ \mu\text{m}$, 粒径分布如图 3 所示。

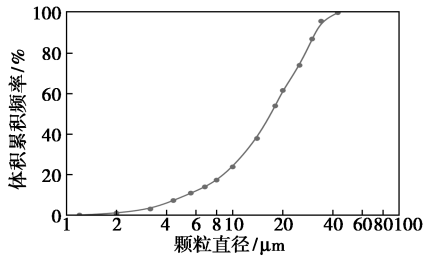


图 3 滑石粉的粒度分布

旋风分离器的压降与入口气速用 U 形管压差计测量。在旋风分离器的入口、出口以及料腿位置设有测压点, 所有测压点的静压用 U 形管压差计测定(如图 2), 压降为入口点静压与出口点静压之差。

采用标准毕托管测量入口气速 V_{in} , 如图 4 所示, 需要经过以下换算得到最终的入口气速^[12-13]。

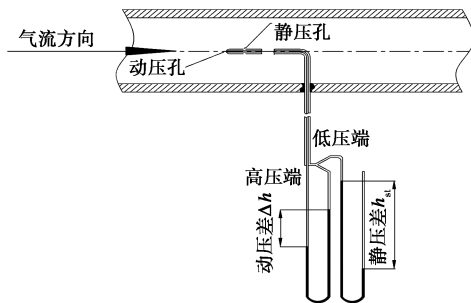


图 4 毕托管测速原理

毕托管测量点的气体流速 V_g :

$$V_g = \sqrt{2\Delta h/\rho_g}$$

式中, Δh 为毕托管动压, Pa; ρ_g 为气体密度, kg/m^3 。

设管道内气体处于湍流状态, 管道内平均气速与最大气速 V_g 的比值一般为 0.84~0.86, 取平均值 0.85, 则通过管道的流量 Q_{in} :

$$Q_{in} = (\pi/4)d^2V_g \times 0.85$$

根据理想气体状态方程有:

$$\rho_g = P_s/(RT_s) = P_s/[R(273 + t_s)]$$

本文中采用负压操作, 故 $P_s = P_a - p_s$, 大气压力 $P_a = 101\,230\text{ Pa}$, 气体常数 $R \approx 286\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。则:

$$Q_{in} = 15.98d^2 \sqrt{[\Delta h(273 + t_s)]/(101\,230 - p_s)}$$

式中, d 为入口管道直径, m; t_s 为大气温度, $^{\circ}\text{C}$; p_s 为毕托管静压, Pa。

通过 V_{in} 与 Q_{in} 的关系可得入口气速为:

$$V_{in} = Q_{in}/(ab)$$

分离效率 E 由称重法确定:

$$E = G_c/G_i$$

式中, G_c 、 G_i , 分别为收料量和入口加料量, kg。

2.3 实验步骤

实验前做好实验准备, 检查实验装置系统是否正常, 用电子秤准确称量设定质量的粉料, 并采用实验粉料对其进行跑合。记录实验环境的温度、湿度, 检查测量系统是否正常运行。

打开离心风机, 通过毕托管测试观察调节阀门开度, 使得入口气速达到实验值, 通过 U 形管压差计读取入口静压、进出口压降及料腿压降。

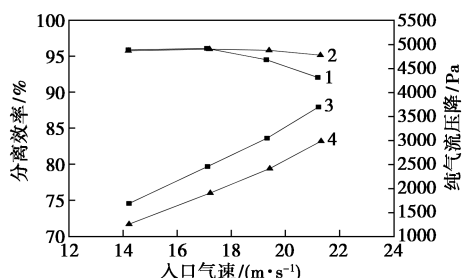
通过加料器将粉料连续、均匀地加入入口水平管道, 开始进行旋风分离实验。要保证在规定的时间内将所有实验粉料连续、均匀地加入旋风分离器, 待粉料全部加入在旋风分离器内后关闭风机。

等待旋风分离器内气流完全消失颗粒完全沉降下来后, 打开收料斗收料, 用电子秤称量粉料质量。

3 实验结果及分析

3.1 新型分离器优化结果

2 种结构的对比试验结果如图 5 所示。



1—基准效率;2—新型效率;3—基准压降;4—新型压降

图 5 新型分离器与基准分离器的实验结果

可以看出新型分离器的压降较基准 PV 型分离器有着非常明显的下降。随着入口风速的增加,这种下降的幅度也在略微地增加。在入口风速为 14.2 m/s 时,压降降低了 430 Pa,降幅为 25.44%;在入口风速为 21.2 m/s 时,压降数值降低了最多的 710 Pa,降幅为 19.19%;其间压降的平均降幅为 21.91%。

对于分离器的效率,基准 PV 型分离器的效率大致呈“驼峰”型,与前人研究成果一致^[14-15];而新型分离器的效率曲线却很平缓,具有更好的操作弹性。在入口速度小于 17.1 m/s 时,新型分离器效率与基准 PV 型分离器效率大致相当,在入口风速为 19.3 m/s 时,新型分离器效率较基准型提高了约 1.3%,而在入口风速为 21.2 m/s 时,新型分离器效率较基准型提高了约 3.1%。

新型分离器最高效率点对应的入口风速在 17.2~19.3 m/s,大于基准 PV 型分离器最高效率点的入口风速 17.1 m/s,因此在最高效率工作时,新型分离器有更大的处理量。当 2 个分离器都在各自的最高效率点工作时,新型分离器与基准型效率相当,但压降降低了约 2 420 Pa,降幅达到了 20.66%。

所以在一般的工业场合,新型分离器能够满足大幅度降低分离器压降的同时保证分离器有着非常高的效率,并且操作弹性良好。

3.2 新型分离器优化结果原因分析

通过以上实验结果可见,新型分离器达到了高效低阻的目的,能够在保证分离器有着高效率的同时,大幅度地降低分离器的压降。对于其中具体的原因分析如下。

(1) 新型结构采用了渐扩型排气管,在前文的设计章节中,采用 PV 型旋风分离器的设计方法,设计了一种渐扩型的排气管,排气管直径比 $d_r^0 = 0.35$ 。首先,这种排气管下口直径比基准 PV 型分离器稍大,因此直接就能部分减少分离器的压降;其次,这种排气管包含了渐扩段和直筒段。在排气管的渐扩段,气流出口面积会不断增大,因此排气管中内旋流的整体速度就会不断减小,这样整体的出口静压就会不断增大,进而部分减小了气流在分离器内部的动能损失,所以能够减小分离器内部的整体压降^[16-17]。

(2) 新型结构采用了新型的入口结构形式。首先采用 270°的蜗壳矩形入口形式,延长了颗粒在分离器内的停留时间;同时增大了入口气流与分离器轴心的距离,能提升效率^[18]。其次,在分离器入口中间增加了 1 块隔板,将入口分隔成了 2 个进气通道。减小了入口来流与回转气流的相互挤压作用和混掺,也缩短了内侧尘粒达到器壁的时间;同时能提升分离空间流场的对称性,抑制了底部的窜流返混。所以新的入口结构能够提升分离器的效率。

(3) 新型结构采用了一种顶部有锥型过渡段的灰斗,这种结构优化后的灰斗可削弱顶灰环,能够减弱灰斗中气流的返混夹带,达到提升分离效率的效果^[19]。并且灰斗设计得足够大,能够增大旋风分离器的操作弹性和稳定性。

(4) 新型结构采用了加长型的筒体和锥体结构,能够增加分离空间的高度,延长颗粒在分离器内部的停留时间;同时使自然旋风长度增长,促进内旋流颗粒再次分离,提升分离器的分离效率^[20]。

4 结论

设计了一种能够保证分离效率不变的情况下大幅度降低压降的新型旋风分离器。新型分离器采用弧形导流板分隔进气的入口结构、渐扩型排气的出口结构,以及加长型的筒体和锥体结构。通过与基准 PV 型分离器的对比试验,可以得出如下结论。

(1) 对比 $\Phi 600$ 的基准 PV 型分离器与新型分离器,在入口风速为 14.2~21.2 m/s 时,压降的平均降幅为 21.91%。且随着入口风速的增加,压降降低的幅度越来越大。

(2) 相较于基准 PV 型分离器,新型分离器的分离效率曲线更为平缓,有更好的操作弹性。随着入口风速的增加,整体效率先增加再减小。2 种分离

器的最高效率点对应的入口风速都是 17.1 m/s 时,新型分离器的效率与基准 PV 型分离器的效率大致相同,差距仅为 0.1%,认为 2 种分离器效率相当。

(3)随着入口风速进一步增大,在入口风速为 19.3 m/s 时,新型分离器效率较基准型提高了约 1.3%,而在入口风速为 21.2 m/s 时,新型分离器效率较基准型提高了约 3.1%。所以在高处理量时,新型分离器的效率明显优于基准 PV 型分离器。

在一般工业运用的场合,新型分离器能够大幅度降低分离器压降的同时保证分离器有着非常高的效率,并且更适合应用在大处理量的环境下,具有良好的操作弹性,拥有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] Gueudré L, Chapon F, Mirodatos C, *et al.* Optimizing the bio-gasoline quantity and quality in fluid catalytic cracking co-refining [J]. *Fuel*, 2017, 192: 60–70.
- [2] Wu F, Wu D. Attrition resistances and mechanisms of three types of FCC catalysts [J]. *Powder Technology*, 2017, 305: 289–296.
- [3] 时铭显,汪云瑛. PV 型旋风分离器尺寸设计的特点 [J]. *石油化工设备技术*, 1992, (4): 14–18.
- [4] 祝立萍. 旋风除尘器弧形导向板技术实验研究 [J]. *冶金动力*, 2003, (3): 46–47.
- [5] Lim K S, Kwon S B, Lee K W. Characteristics of the collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2003, 34(8): 1085–1095.
- [6] 沈恒根,党义荣. 双进口旋风器内流场的实验研究 [J]. *西安建筑科技大学学报:自然科学版*, 1997, (3): 275–277.
- [7] Hwang K J, Chou S P. Designing vortex finder structure for improving the particle separation efficiency of a hydrocyclone [J]. *Separation & Purification Technology*, 2017, 172: 76–84.
- [8] 陈建义,罗晓兰,时铭显. PV-E 型旋风分离器性能试验研究 [J]. *流体机械*, 2004, 32(3): 1–4.
- [9] 钱付平,章名耀. 不同排尘结构旋风分离器的分离特性 [J]. *燃烧科学与技术*, 2006, 12(2): 169–174.
- [10] 徐俊,宋健斐,王姗姗,等. PV 型旋风分离器的性能改进实验和分析(III)–灰斗结构 [J]. *炼油技术与工程*, 2009, 39(12): 28–30.
- [11] 王成,陈建义. 旋风分离器灰斗结构的试验研究 [J]. *流体机械*, 2007, 35(3): 6–9.
- [12] 王敏,周数道. 影响毕托管测风精度的几个因素 [J]. *实验室研究与探索*, 2010, 29(3): 35–37.
- [13] Galas C, Umberto S, Maria B. Inter comparison of suspended particles sampling methodologies [J]. *Accred Qual Assur*, 2002, (7): 202–208.
- [14] Chen S, Liu P, Gong J. Performance study of backflow type dynamic cyclone separator for coalbed methane [J]. *Powder Technology*, 2016, 305: 56–62.
- [15] 时铭显,吴小林. 旋风分离器的大型冷模试验研究 [J]. *化工机械*, 1993, (4): 187–192.
- [16] Parvaz F, Hosseini S H, Ahmadi G, *et al.* Impacts of the vortex finder eccentricity on the flow pattern and performance of a gas cyclone [J]. *Separation & Purification Technology*, 2017, 187: 1–13.
- [17] Song J, Wei Y, Sun G, *et al.* Experimental and CFD study of particle deposition on the outer surface of vortex finder of a cyclone separator [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 309: 249–262.
- [18] Alitavoli M, Mahmoodabadi M J, Sahnehsaraei M A, *et al.* Pareto optimum design of cyclone separator [C] // *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications. IEEE*, 2012: 1–5.
- [19] 何兴建,礼晓宇,宋健斐,等. 旋风分离器顶灰环灰量的实验测量 [J]. *当代化工*, 2015, (5): 1143–1146.
- [20] Rafiee S E, Sadeghiazad M M. Efficiency evaluation of vortex tube cyclone separator [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 114: 300–327. ■
- [21]
- [22] Wang L, Wang G, Wang L, *et al.* Novel urea-assisted hydrothermal synthesis of tetrametallic $\text{Co}_6\text{Fe}_4\text{Mo}_{12}\text{Bi}_{1.5}\text{O}_x$ phase for the selective oxidation of tert-butyl alcohol to methacrolein [J]. *Catalysis Communications*, 2019, 130: 105762.
- [23] Wang L, Wang L, Wang G, *et al.* Allylic selective oxidation of tert-butyl alcohol to methacrolein: Cooperative catalysis of two different active sites [J]. *Catalysis Communications*, 2019, 130: 105765.
- [24] Zhai Z, Wang X, Licht R, *et al.* Selective oxidation and oxidative dehydrogenation of hydrocarbons on bismuth vanadium molybdenum oxide [J]. *Journal of Catalysis*, 2015, 325: 87–100.
- [25] Védrine J C, Hutchings G J, Kiely C J. Molybdenum oxide model catalysts and vanadium phosphates as actual catalysts for understanding heterogeneous catalytic partial oxidation reactions: A contribution by Jean-Claude Volta [J]. *Catalysis Today*, 2013, 217: 57–64.
- [26] Kendell S, Brown T. Detailed product and kinetic analysis for the low-pressure selective oxidation of isobutane over phosphomolybdic acid [J]. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2010, 99(2): 251–268.
- [27] Moro-Oka Y, Ueda W. Multicomponent bismuth molybdate catalyst: A highly functionalized catalyst system for the selective oxidation of olefin [J]. *Advances in Catalysis*, 1994, 40: 233–273.
- [28] Matsuura I, Wolfs M W J. X-ray photoelectron spectroscopy study of some bismuth molybdates and multicomponent molybdates [J]. *Journal of Catalysis*, 1975, 37(1): 174–178.
- [29] 房德仁,任万忠,王文华,等. 一种复合氧化物催化剂及制备方法: CN, 104801312A [P]. 2015-07-29. ■

(上接第 204 页)