

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.01.009

旋流分离器在去除航空煤油固相杂质中的应用研究*

蔡亮¹, 翟加钢¹, 张栋^{2,3}, 许晶禹^{2,3}

- (1. 中国航油集团津京管道运输有限责任公司, 天津 300300, Email: 124391114@qq.com;
2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;
3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 该文基于数值模拟和实验测试对旋流器在去除航空煤油固相杂质中的特性进行了研究。数值模拟主要分析了粒径大小对旋流器分离性能的影响, 结果表明粒径较大时的分离效率能够达到60%以上。随后, 基于数值模拟结果设计了工业样机, 通过现场测试得出旋流器能够将中值粒径48.06 μm以上的杂质去除, 并且平均去除率达到88.4%, 从而验证了利用旋流器去除航油中固相杂质的可行性。

关键词: 旋流器; 航空煤油; 分离效率

中图分类号: O359+1

文献标志码: A

Application study of cyclone separator to remove solid impurities from aviation kerosene

CAI Liang¹, ZHAI Jia-gang¹, ZHANG Dong^{2,3}, XU Jing-yu^{2,3}

- (1. China National Aviation Fuel TSN-PEK Pipeline Transportation Corporation, Tianjin 300300, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper uses numerical simulation and experimental test to study the characteristics of cyclone in removal of solid-phase impurities from aviation kerosene. In numerical simulation studies, the effect of diameter on the separation of the cyclone is investigated. The results show that the separation efficiency can reach more than 60% when the particle size is large. Subsequently, the industrial prototype is designed according to the numerical simulation results. In the on-site tests, the cyclone can remove impurities having a median particle diameter of 48.06 μm or more. Furthermore, the average removal rate of solid impurities is up to 88.4%. Thus, the feasibility of using cyclone to remove solid impurities in aviation kerosene is verified.

Key words: cyclone; aviation kerosene; separation efficiency

* **收稿日期:** 2017-04-19(2017-12-18 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金(51779243)

作者简介: 蔡亮(1973—), 男, 天津人, 高级工程师。

通讯作者: 许晶禹, Email: xujingyu@imech.ac.cn

Received: April 19, 2017 (**Revised** December 18, 2017)

Project supported by foundation: Supported by the National Nature Science Foundation of China(51779243)

Biography: CAI Liang (1973—), Male, Senior Engineer.

Corresponding author: XU Jing-yu, Email: xujingyu@imech.ac.cn

引言

近年来,随着航空业的迅速发展,航空发动机对燃料的质量要求越来越高。但是,由于航空煤油在管路运输过程中会发生管路的锈蚀,因此航油中往往会带有铁屑等固体杂质,严重影响了油品质量。目前,油站采用过滤法去除航油中的固相杂质,即在航油出站之前进入煤油过滤器,通过孔隙较小的滤网将液相中的固相杂质分离,达到去除铁屑等杂质的目的。但是当航油中的铁屑等杂质含量较多时,过滤器的聚结滤芯工作负荷大,杂质容易堵塞滤芯,导致过滤器的压差升高,过滤效果下降,因此过滤器滤芯需要经常更换,这样一方面增加了工人的工作量,并且在更换过程中容易造成安全隐患;另一方面滤芯价格昂贵,更换滤芯的成本高,经济负担较重。为了能够有效地去除航油中的固相杂质,减轻过滤器的工作负荷,延长过滤器滤芯更换周期,在过滤器之前添加旋流分离器预先除去大颗粒杂质,是一种节约成本的手段,具有较好的推广价值。

针对旋流器中液固两相流的强旋流场,国内外学者已经进行了深入的研究。有学者利用先进的物理测量方法对旋流分离器内部的高速旋流场进行测量^[1-3],但由于技术手段的限制,两相流的物理测试依然很有限。因此针对旋流分离器内部多相旋流场,大多数学者采用数值计算方法进行模拟。翟加钢等^[4]利用计算流体力学方法,对液固旋流分离器中的分离过程进行了数值模拟研究。Wang等^[5]通过实验和数值模拟对影响水力旋流器分离效果的影响因素进行分析,得到较小固相粒径对旋流器的入口条件更加敏感。Gao等^[6]对水力旋流器内的流场特征进行了研究,发现水力旋流器的结构及操作参数对内部流场影响很大。

为了研究旋流分离器在去除航空煤油中固相杂质的效率,本文首先借助FLUENT软件对旋流分离器内部流动状况进行了模拟,并对旋流器的分离情况进行了预测,从而为旋流器的定型设计提供了依据;随后在此基础上设计加工了一套工业样机,并在中航油某油库区进行现场了测试,得到了较好的分离效果。

1 数值模拟

1.1 控制方程和湍流模型

目前常用的两相流模型有均相流模型、漂移流模型、分相流模型、双流体模型和离散颗粒相模型

等。通常,当固相含率较低时(<10%)计算通常采用离散颗粒相模型^[7]。离散颗粒相模型假设颗粒无破碎与聚并^[8],因此该模型主要用于旋流场中液固两相流动研究中。为了研究颗粒在流体中的运动,首先要知道他所在的流场信息,在了解流场信息的基础上,计算流体对颗粒施加的力来计算颗粒的加速度,从而结合颗粒的初始速度来确定下一个时间步颗粒的位置。因此,颗粒的运动轨迹采用单向耦合的拉格朗日方法进行追踪,也就是先计算流场,然后计算流场对颗粒作用力,在此不考虑颗粒对流场的影响。在这样的前提条件下,建立的连续相控制方程(Euler方程)为:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \mathbf{u}_c) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_c \mathbf{u}_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \mathbf{u}_c \mathbf{u}_c) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_c) - \nabla p + \rho_c \mathbf{g} \quad (2)$$

分散相颗粒的控制方程(Lagrange方程):

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m_p \mathbf{g} + m_c \left(\frac{D\mathbf{u}_c}{Dt} - \mathbf{g} \right) + F_D + F_H + F_M + F_L \quad (3)$$

式中:下标 c 和 p 分别为连续相和分散相颗粒, ρ_c 为连续相的密度, t 为时间, \mathbf{u}_c 和 \mathbf{u}_p 为连续相和分散相颗粒的速度, μ_c 为连续相的动力黏度, $\boldsymbol{\tau}_c$ 为应力张量, p 为压力, F_D 、 F_H 、 F_M 和 F_L 分别为分散相颗粒在流场中受到的阻力、虚拟质量力、历史力和升力。

旋流分离器内的流动为复杂的湍流运动,选择合适的湍流模型是模拟计算的关键。雷诺应力湍流模型(RSM)考虑了流线弯曲、旋涡、旋转和张力快速变化,他对于复杂流动有较高精度的预测能力。相关研究表明,RSM湍流模型对于旋流分离器内的复杂湍流运动有较好的预测结果^[9,10],其输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\overline{\rho u_i' u_j'} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{\rho u_k' u_i' u_j'} \right) =$$

$$P_{ij} + D_{Tij} + \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} \quad (4)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (5)$$

$$D_{Tij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + p \left(\overline{\delta_{kj} u_i'} + \overline{\delta_{ik} u_j'} \right) \right] \quad (6)$$

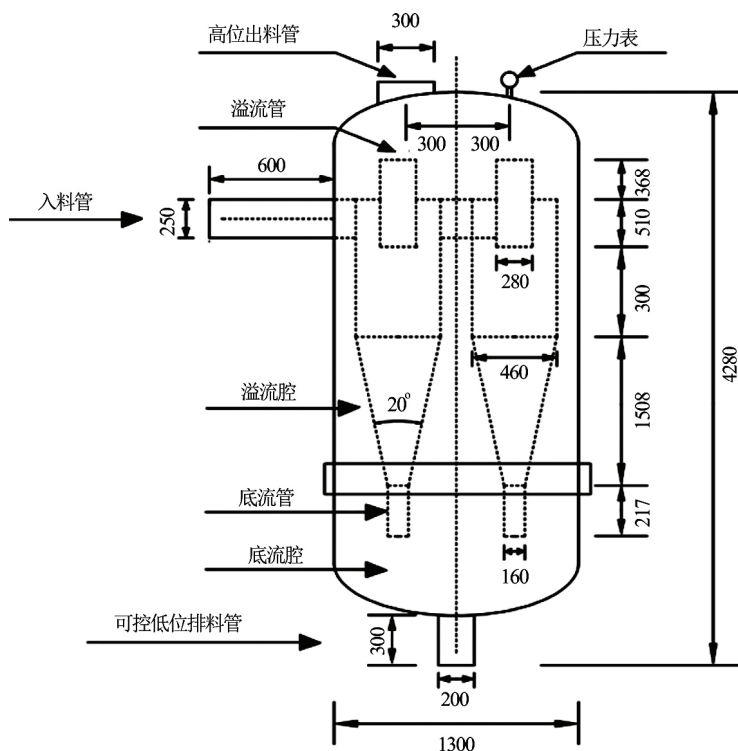


图1 旋流分离器结构图

Fig.1 Structure diagram of cyclone separator

$$\phi_{ij} = \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (8)$$

$$F_{ij} = -2\rho\Omega_k \left(\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm} \right) \quad (9)$$

式中: P_{ij} 为应力产生项, D_{ij} 为扩散项, ϕ_{ij} 为压力应变项, ε_{ij} 为黏性耗散项, F_{ij} 为旋转产生项。

1.2 边界条件和网格划分

入口边界采用均匀来流速度, 出口采用自由出口边界条件, 壁面采用无滑移边界条件, 壁面粗糙度为默认值0.5。因为贴近壁面的区域内, 层流底层的黏性作用相对减弱了湍流扩散作用, 此时高雷诺数的湍流输运方程不再严格有效, 因此采用标准壁面函数法处理边界湍流。同时入口固相颗粒在悬浮液中是均匀分布的, 且与液相速度相同。利用GAMBIT 6.3.26进行建模并划分网格。

图1给出了旋流分离器的结构图。旋流分离器带有进料管、溢流管和底流管, 置于压力密封罐中。压力密封罐中间设有隔板将罐体分为溢流腔和底流

腔, 溢流腔设有高位出料管和可控低位排料管, 底流腔设有可控低位出料管。含杂质航油经进料管进入设备, 在旋流器的作用下, 大部分航油连同少部分杂质通过溢流管进入溢流罐, 并在罐体中沉淀, 澄清的航油从高位出料管排出, 杂质从可控低位排料管间断排出; 少部分航油连同大部分杂质通过底流管进入沉砂腔, 并在沉砂腔中沉淀, 高浓度杂质从可控低位出料管间歇排料。

图2为三维实体模型。网格划分过程中, 对模型进行分区, 将结构复杂且流向发生剧烈变化的结构分割, 采用四面体非结构化网格, 并对网格进行加密; 在结构比较规整且流向变化比较平缓的地方, 采用六面体网格, 相应网格较稀疏。网格生成后, 对网格进行光顺化处理。整体的网格数目约150万。

1.3 颗粒粒径对分离效果的影响

本文中所用到的航空煤油为连续相, 密度 800.0 kg/m^3 , 黏度 $0.002 \text{ Pa} \cdot \text{s}$; 分散相为杂质颗粒, 密度 3000 kg/m^3 , 涉及到的参数定义为:

$$F = \frac{Q_o}{Q_i} \quad (10)$$

式中: F 为溢流口分流比, Q_o 为溢流口流量, Q_i 为入口流量。对于某直径颗粒, 分离效率计算公式如下所示:

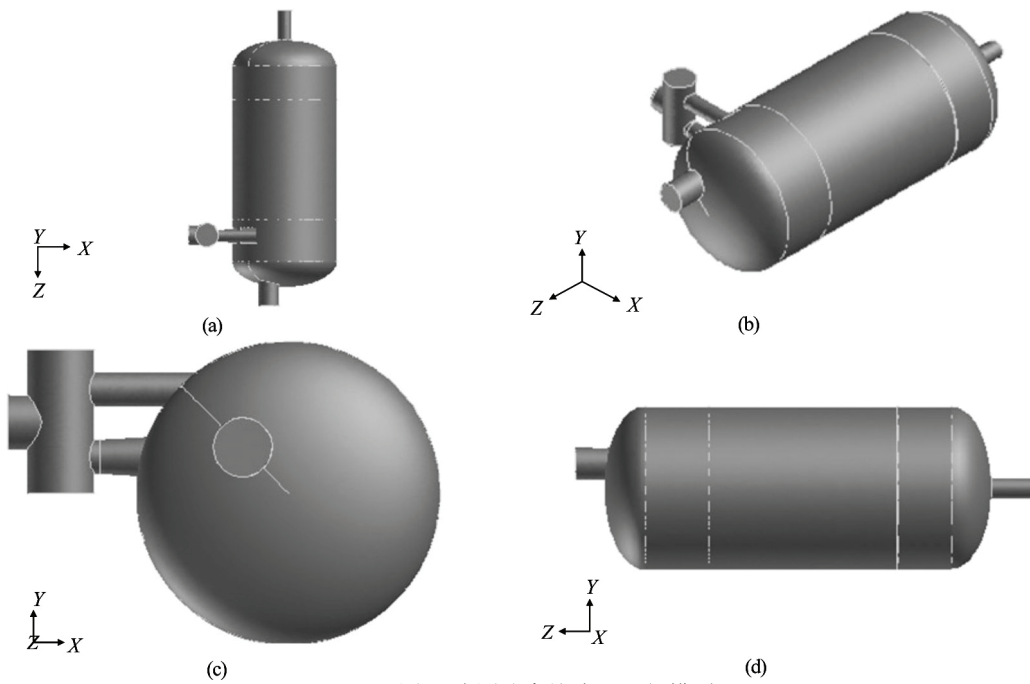


图 2 液固分离旋流器几何模型
Fig.2 Geometry model of solid-liquid separation cyclone

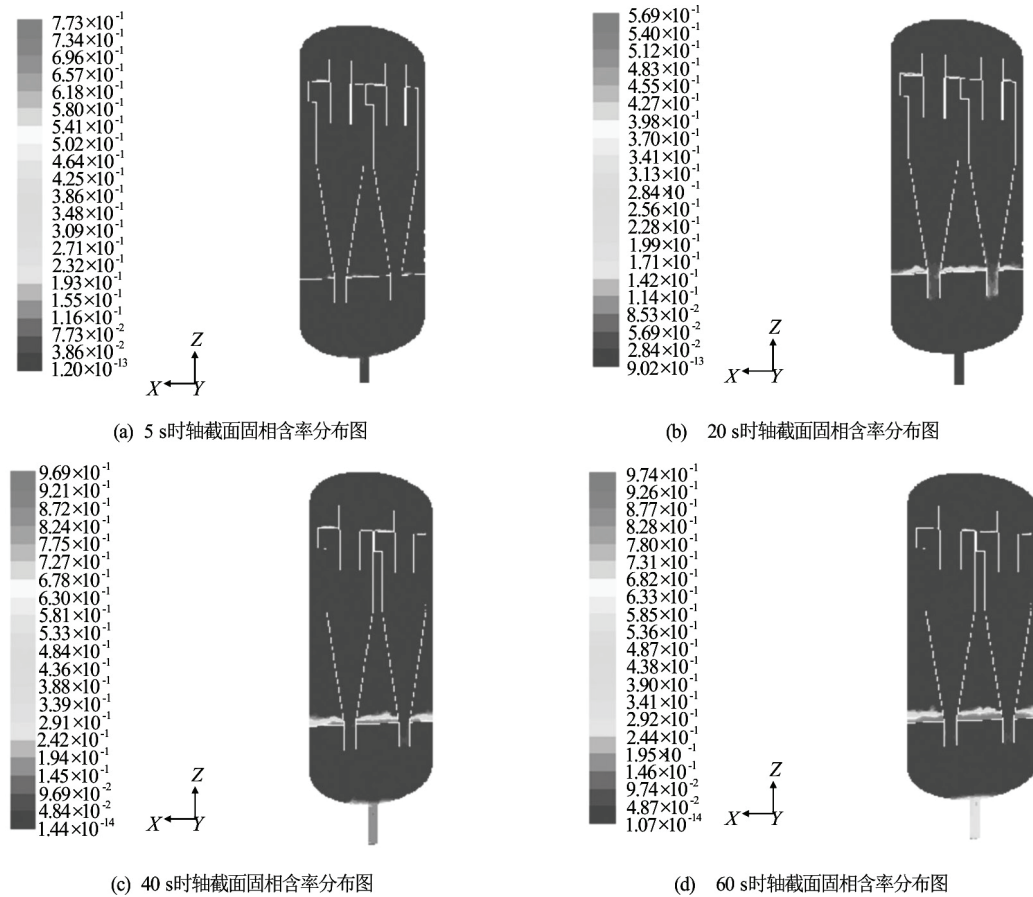


图 3 不同时间下的固相含率分布图(流量: 430 m³/h, 含率: 0.1%)
Fig.3 Solid phase distributions at the different time (flow rate: 430m³/h, volume concentration: 0.1%)

$$E = 1 - \frac{Q_{po}}{Q_{pl}} \quad (11)$$

式中: Q_{po} 为该直径颗粒在溢流口的流量; Q_{pl} 为入口处该直径颗粒的流量。

首先, 通过数值模拟得到了粒径为30目时的分离效果。计算过程中, 将固相含率设置为0.1%, 入口流量为430 m³/h, 旋流器溢流口和整体结构的顶部出口分流比为1, 底部出口的分流比为0。图3给出了不同时间下的固相含率分布云图。从图中可以看出, 随着时间的推移, 分离出的固相颗粒逐渐沉积在中间隔板上。分离效率随时间的变化关系如图4所示。可以看出, 该旋流器对于粒径为30目的颗粒分离效果较好, 其60 s后分离效率能够达到80%左右。

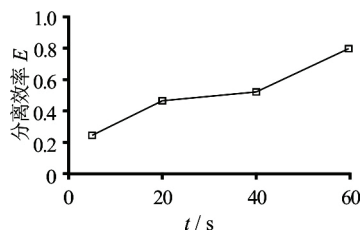


图4 分离效率随时间的变化规律
(流量:430 m³/h, 含率: 0.1%)

Fig.4 Separation efficiency as a function of time
(flow rate: 430 m³/h, volume concentration: 0.1%)

随后, 在保持入口固相含率和流量不变且各出口流量相等的前提下, 分别计算了不同固相颗粒粒径的分离状况, 得到固相含率的分离效率随粒

表 1 不同粒径下的分离效率

颗粒粒径 / 目	分离效率	时间 / S
2	0.873	2
4	0.859	2
6	0.847	2
8	0.828	2
10	0.808	2
12	0.674	4
14	0.691	15
16	0.617	25
18	0.585	20
20	0.594	30
30	0.792	60
40	0.717	50
50	0.616	45
60	0.096	100
70	0.075	200
80	0.136	800
100	0.045	350

径变化规律, 如表1所示。可以看出, 当入口流量为430 m³/h, 固相含率为0.1%时, 旋流分离器能很好地分出粒径为2目至50目之间的固体颗粒, 分离效率高于60%; 对于粒径为60目至100目之间的固相颗粒, 其分离效率则不高于15%。由于无论颗粒是基于重力还是离心原理进行沉降分离, 所受到的力均至少与颗粒的直径平方成正比, 因此颗粒粒径越大,

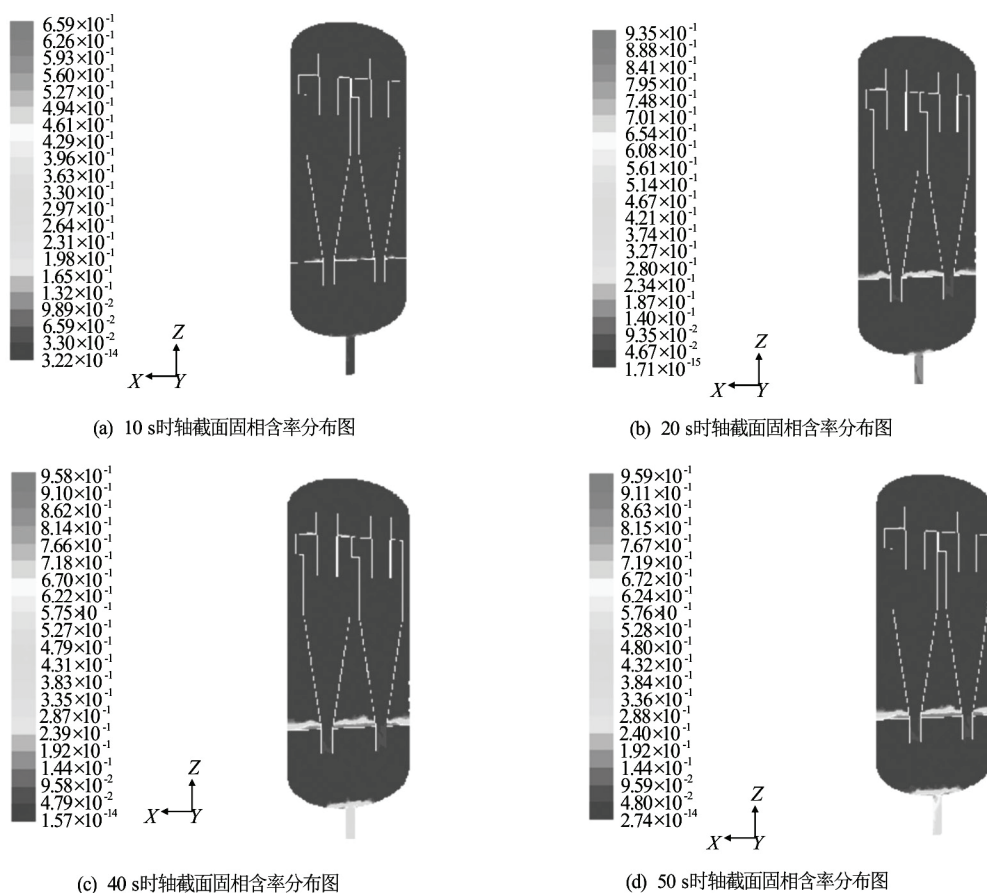


图5 不同时间下的固相含率分布图(流量: 520 m³/h, 含率: 0.1%)
Fig.5 Solid phase distributions at the different time (Flow rate: 520 m³/h, Volume concentration: 0.1%)

分离效果会越好。本数值模拟的结果与该结论吻合，即表明该旋流分离器对较大粒径的分离效果要明显优于细微粒径的效果。

1.4 颗粒粒径对分离效果的影响

当入口流量为520 m³/h，体积含率为0.1%时，对粒径为30目时的分离情况进行了模拟。计算过程中，将旋流器溢流口和整体结构的顶部出口分流比为1，底部出口的分流比为0。图5给出了不同时间下的固相含率分布云图。从图中可以看出，随着时间的推移，分离出的固相颗粒逐渐沉积在中间隔板上。通过与图4进行对比，可以发现当流量为520 m³/h时，底流腔内较早地出现杂质的堆积。分离效率随时间的变化关系如图6所示。可以看出，相比于流量为430 m³/h时的分离效率，流量为520 m³/h时该旋流器对于粒径为30目的颗粒分离效率有了明显的降低，由原来的80%下降至69%。

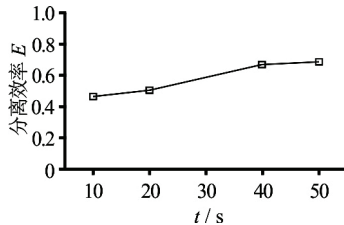


图6 分离效率随时间的变化规律 (流量: 520 m³/h, 含率: 0.1%)

Fig.6 Separation efficiencies as a function of time (Flow rate: 520 m³/h, Volume concentration: 0.1%)

表2给出了流量分别为430 m³/h和520 m³/h时的分离效率。通过对比，可以发现随着入口流量变大，分离效率有一定的降低。当入口流量为520 m³/h，固相含率为0.1%时，新设计的旋流器依然对粒径为2目至30目之间的固体颗粒有很好的分离效果。

表2 不同流量下的分离效率(含率: 0.1%)

Table 2. Separation efficiencies at the different flow rates (Volume concentration: 0.1%)

颗粒粒径/目	分离效率	
	入口流量(430m ³ /h)	入口流量(520m ³ /h)
2	0.873	0.789
4	0.859	0.816
6	0.847	0.787
8	0.828	0.778
10	0.808	0.609
12	0.674	0.637
14	0.691	0.599
16	0.617	0.614
18	0.585	0.614
20	0.594	0.612
30	0.792	0.686

2 旋流分离器现场测试

基于数值模拟的研究结果，设计加工了一套旋

流分离器用于去除航空煤油中的固体杂质。图7给出了现场设备照片，设备尺寸见图1。实际运行中将其放置于过滤器之前，与过滤器配合使用，用于去除粗粒铁屑等杂质。实验测试了旋流器入料流量分别为215 m³/h、307 m³/h、331 m³/h、358 m³/h、391 m³/h和430 m³/h时，旋流分离器的除杂效果。表3给出了不同入料流量下分离器分离后的固相含率。从表中可以看出，溢流中的固体含量明显小于入料中的固体含量，入料的平均固相含率为2.827 mg/L，溢流的平均固相含率为0.3267 mg/L；计算得固体杂质的平均去除率达到88.4%。这说明旋流分离器对航油中的固相杂质有较好的分离效果，达到了除杂的目的。



图7 旋流分离器现场安装图

Fig.7 Site installation drawing of separation cyclone

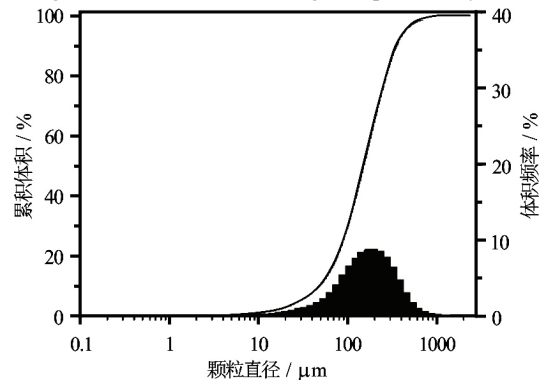


图8 入料样品的粒径分布

Fig.8 Particle size distribution of the inlet samples

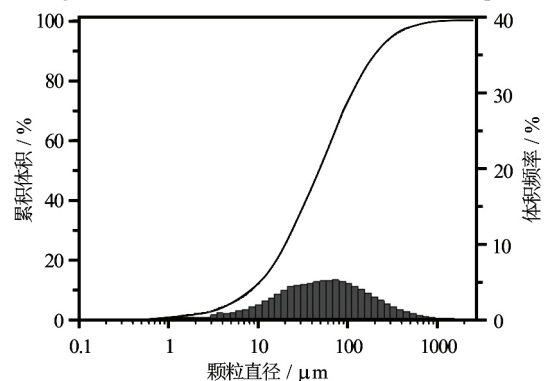


图9 入料样品的粒径分布

Fig.9 Particle size distribution of the inlet samples

表3 入料流量对分离效果的影响

进料流量/ (m ³ /h)	入料/(mg/L)	溢流/(mg/L)
215	3.84	0.31
307	0.49	0.26
331	3.61	0.18
358	1.75	0.42
391	2.91	0.31
430	4.36	0.48
平均值	2.827	0.3267

此外, 当流量为430 m³/h时, 使用马尔文激光粒度分析仪(Malvern INSITEX SX laser particle size analyzer)对入料及溢流的沉淀底泥进行粒径分布分析。图8和图9分别给出了入料和溢流样品的粒径分布。可以看出, 经过旋流器之后的杂质中值粒径从原来的151.36 μm降低为48.06 μm, 进一步说明了旋流分离器分离效果明显(表4)。并且经过对比可以发现, 旋流器对20 μm的细微颗粒也有一定的去除作用。

表4 样品粒径分布特性表

Table 4. Particle size distribution of the samples

样品来源	D ₅ /μm	D ₅₀ /μm	D ₉₅ /μm
入料底沙	28.33	151.36	443.2
溢流沉沙	4.61	48.06	330.2

3 结论

本文基于数值模拟对旋流器在去除航空煤油固相杂质中的特性进行了研究, 主要分析了粒径大小对分离性能的作用, 同时设计了工业样机进行了现场测试, 得出以下结论:

(1) 当入口流量为430 m³/h, 固相含率为0.1%时, 旋流器能很好地分出粒径为2目至50目之间的固体颗粒, 且分离效率超过60%; 对于粒径为60目至100目之间的固相颗粒, 具有一定的分离效率, 但分离效率不高于15%。当入口流量为520 m³/h, 固相含率为0.1%, 新设计的旋流器依然对粒径2目至30目之间的固体颗粒有很好的分离效果。但随着流量的变大, 分离效率有一定的降低。

(2) 现场工业样机测试中, 经过旋流器之后杂质的中值粒径从原来的151.36 μm降低为48.06 μm, 固体杂质的平均去除率达到88.4%, 证明了旋流器对航油中的固相杂质有较好的分离效果, 能够降低过滤器滤芯的堵塞, 延长滤芯的使用寿命, 达到除杂目的。

参 考 文 献:

- [1] 赵涛, 陈伟东, 邱秀云. 浑水水力分离清水装置柱体高度对流场影响的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2011, 26(6): 681-688.
ZHAO Tao, CHEN Wei-dong, QIU Xiu-yun. Numerical simulation on flow field influenced by cylinder height water hydraulic power separation device[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(6): 681-688.
- [2] 王小兵, 刘扬, 崔海清, 等. 水力旋流器内部流体流动特性 PIV 实验[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 143-149.
WANG Xiao-bing, LIU Yang, GUI Hai-qing, et al. A PIV experimental study on fluid flow characteristics in hydrocyclone[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 143-149.
- [3] 韩婕, 汪华林, 马吉. 水力旋流器速度场的 PDPA 测试研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(5): 1101-1106.
HAN Jie, WANG Hua-lin, MA Ji. Study on velocity field in hydrocyclone model by PDPA measurement[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(5): 1101-1106.
- [4] 翟加钢, 刘海飞, 许晶禹. 液-固旋流器分离过程的数值模拟[J]. 油气储运, 2014, 33(4): 412-417.
ZHAI Jia-gang, LIU Hai-fei, XU Jing-yu. Numerical simulation of the separation process of liquid-solid hydrocyclone[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(4): 412-417.
- [5] WANG Li-yang, ZHENG Zhi-chu, WU Ying-xiang, et al. Numerical and experimental study on liquid-solid flow in a hydrocyclone[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(3): 408-414.
- [6] GAO S L, WEI D Z, LIU W G, et al. CFD numerical simulation of flow velocity characteristics of hydrocyclone[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China: English Edition, 2011, 21(12): 2783-2789.
- [7] FRIES L, ANTONYUK S, HEINRICH S, et al. Product design based on discrete particle modeling of a fluidized bed granulator[J]. Particuology, 2014, 12(1): 13-24.
- [8] SCHNEIDERBAUER S, HAIDER M F, HAUZENBERGER F, et al. A Lagrangian-Eulerian hybrid model for the simulation of industrial-scale gas-solid cyclones[J]. Powder Technology, 2016, 304: 229-240.

- [9] KHAN Z, JOSHI J B. Comparison of $k-\varepsilon$, RSM and LES models for the prediction of flow pattern in jet loop reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 127: 323-333.
- [10] 周大伟, 向晓东. 环缝内衬固液分离耐磨旋流器磨损的数值模拟[J]. 化工进展, 2016, 35(2): 397-402.
- ZHOU Da-wei, XIANG Xiao-dong. Numerical simulation of the attrition in solid-liquid wear-resisting cyclones with the ring seam liner[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(2): 397-402.