

文章编号:2095-0411(2016)04-0059-05

超疏水材料在水力旋流器上的应用实验研究

朱 伟¹,赵会军²,齐玉成¹,朱宇轩¹

(1.常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213016;2.江苏省油气储运技术重点实验室(常州大学),江苏 常州 213016)

摘要:利用正十二硫醇对经过酸蚀以后的铜网进行表面修饰,制成水接触角大于 140° ,滚动角 5.6° ,甲苯接触角约为 5° 的超疏水材料。将其用于替代旋流器溢流管在旋流腔内的材料,降低短路流与循环流对分离效率的影响。通过室内建立有效的实验装置对分离效果进行实验,验证了超疏水材料在旋流器上的应用是可行的,采用 300 目铜网改进的溢流管结构能把分离效率从使用的 84.8% 提高至 88.9% 。

关键词:超疏水材料;水力旋流器;分离效率;溢流管

中图分类号:TQ 316.334

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.04.011

Experimental Study on the Application of Super Hydrophobic Material in the Hydrocyclone

ZHU Wei¹, ZHAO Huijun², QI Yucheng¹, ZHU Yuxuan¹

(1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: 1-Dodecanethiol was used to modify the surface of copper mesh after acid etching. The new type of super hydrophobic material was made, whose contact angle was more than 140° , rolling angle was 5.6° , and the toluene angle was close to 5° . The material is used to replace the overflow pipe in the swirl chamber, reduce the effect of the short circuit and the circulating flow on the separation efficiency. The separation effect is quantified by the effective experimental apparatus. It is verified that the application of the super hydrophobic material on the cyclone is feasible. The improved overflow pipe structure with 300 mesh copper mesh can improve the separation efficiency from 84.8% to 88.9% .

Key words: super hydrophobic material; hydrocyclone; separation efficiency; overflow pipe

近年来随着油藏注水开采方式在石油行业更加广泛的应用,原油采出时的含水率也在快速增加。原油脱水的工作量与难度也随之快速增加。原有的重力法、气浮法等已无法满足日益增加的油水分离作业,尤其是对于面积有限的海上平台。水力旋流

器由于其没有运动部件、维护成本低、占地面积小、分离速度快等众多优点,逐渐成为油水分离方面的新宠。虽然水力旋流器的结构简单,其内部的流体动力学行为却是非常复杂的。短路流、循环流是流场的基本特性,这导致在分离过程中一些无法避免

收稿日期:2016-01-05。

基金项目:江苏省自然科学基金资助(BK20150269)。

作者简介:朱伟(1990—),男,江苏苏州人,硕士生。通讯联系人:赵会军(1965—),E-mail:zhj@cczu.edu.cn

的缺陷^[1]。短路流、循环流的流量的大小与溢流管的结构有直接的相关。同时溢流管的结构对旋流器的压降也有直接的关系,因此对溢流管的优化成为重要的问题。

随着超疏水材料的不断发展,越来越多的新型材料具备了超疏水的性能,因此超疏水材料在油水分离方面的应用也更加广泛。超疏水材料^[2]通常都具有水接触角大于 140°和滚动角小于 5°~10°的特性。在这些表面上,水滴能够很好地保持球形并自由滚落。对于超疏水材料的制作主要有两个方法,一种是在低表面能材料上制备微/纳米级的粗糙度,另一种在较高表面能的材料上制备微/纳米级的粗糙度,将其表面修改至与低表面能一致^[3]。

1 分离原理

由于旋流器内部存在短路流、循环流^[4],致使溢流管外壁聚集了很多游离的油滴。实验通过改变溢流管深入旋流腔管段的表面特性,使油滴更多的进入溢流管内,在减小短路流与循环流影响的作用的同时增加分离效率。

聚集在溢流管外壁上的油滴在毛细作用与范德华引力的共同作用下,油滴能够先于水滴渗入铜网之中。同时由于油滴之间较强的黏合性致使更多的油滴聚集在到溢流管壁上形成一层油膜。同时油膜又会进一步阻止水滴渗入溢流管内部,从而减小底流的含油量,提高分离效率。因此运用超疏水材料制备溢流管^[4],可以提高分离效率,提高分离精度。

使用十二硫醇对经蚀刻的铜网进行表面改性^[5],使其具有疏水亲油的特性^[6]。铜网同时具备疏水和亲油性能,其表面与水接触角大于 140°和甲苯接触角约为 5°,因此可以有效的进行油水分离。

2 实 验

2.1 物 料

铜网(100、200、300 目)、氮气、丙酮、乙醇、硝酸、冰醋酸、盐酸(35%)、正十二硫醇、蒸馏水(密度 1 000 kg/m³)、含油污水(油相体积分数 2%;油相密度 892 kg/m³;油相动力黏度 3 120 mPa·s)

2.2 旋流器的选择

液液水力旋流器的分离效率、分离效果与其结构参数、操作参数有直接关系,不同特征参数下,其分离效率、分离效果差别较大。

2.2.1 分流比

水力旋流器的分流比是旋流器出口流量与入口流量的比值,由于旋流器本身具有两个出口即底流口和溢流口,因此分流比也必然分为溢流分流比与底流分流比

溢流分流比

$$F_u = \frac{Q_u}{Q_i}$$

底流分流比

$$F_d = \frac{Q_d}{Q_i}$$

式中:Q_i 为旋流器入口流量, m³/h; Q_d 为底流口流量, m³/h; Q_u 为溢流口流量, m³/h。

由于试验用的油田含油污水含水量较大,主要使用旋流器脱除含油污水中的油相,所以底流为主液流,溢流为次,选择溢流分流比为实验所指的分流比。

2.2.2 压力降

由于所选水力旋流器为 Thew 型双锥双入口型液液水力旋流器,因此会出现两个入口压力。本实验为简化实验,在进料管处进行调节,调节两个入口的入口流量与入口压力保持一致。由于旋流器本身具有两个出口即底流口和溢流口,使得旋流器压降^[7]具有两层含义。

溢流口压力降

$$\Delta P_u = P_i - P_u$$

底流口压力降

$$\Delta P_d = P_i - P_d$$

式中:P_i 为旋流器入口压力, MPa; P_d 为底流口压力, MPa; P_u 为溢流口压力, MPa。

对于脱油型水力旋流器,由于其分离的流体含油量低,溢流口流量相对较小,所以 DP_d 更为重要。由于压降为旋流器分离过程提供了所有的能量,因此在分离效率与处理量不变的情况下,压降越小越好。

2.2.3 分离效率

对于水力旋流器而言,分离效率的表达式具有多种形式,主要包括质量效率、简化效率、综合效率等等。为了更加清晰地表达水力旋流器的实际分离效果,本实验采用简化效率作为旋流器分离效率^[8]的计算公式

$$E_j = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_i}\right) \times 100\%$$

式中:ρ_d 为底流口排出物中油含量, mg/L; ρ_i 为进

料口物料中油含量, mg/L。

参照油田含油污水物性特征,同时结合 Thew 型双锥双入口型液液旋流器的基本结构参数,确定本实验采用的水力旋流器结构参数如图 1 所示。取大小锥结合处直径为 $D=30\text{mm}$ 。

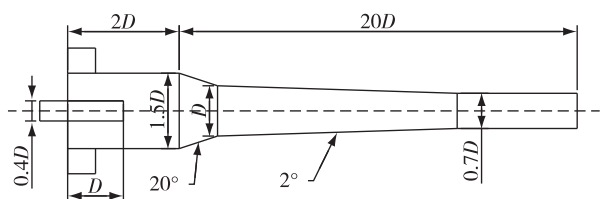


图 1 水力旋流器的结构参数

Fig.1 Structural parameters of hydrocyclone

由于溢流管的深入长度前人已作出很多深入的研究,因此本实验的溢流管深入长度(深入至旋流腔内部长度)选择为 30mm。在标准脱油型液液水力旋流器溢流管的基础上对溢流管进行改进。仍采用圆柱型的溢流管,具体结构参数图 2 所示。将表面修饰过的铜网固定在溢流管外部的开口位置。

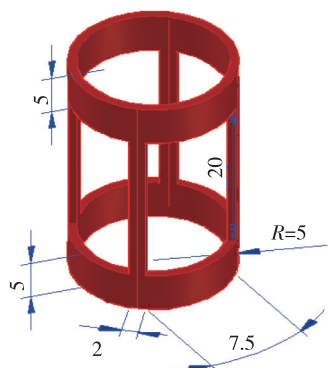


图 2 溢流管深入部分尺寸

Fig.2 The depth dimension of overflow pipe

2.3 超疏水铜网的制备

分别将 100、200、300 目的铜网剪成 $38\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的小块。将剪好的铜网依次放置于丙酮,乙醇,蒸馏水中用超声波清洗 10min。将清洗后的铜网浸没于 12% HNO_3 溶液中 4min,取出后用蒸馏水洗净。然后将其浸没于 0.015mol/L 盐酸与 0.004mol/L 的冰醋酸以 3:1 比例混合的混合液中 24h,以获得蚀刻所需的表面粗糙度。在氮气保护下对铜网进行烘干。将烘干后的铜网浸没于正十二硫醇含量为 1% 的乙醇溶液中 30min。

2.4 实验流程

为更好地研究旋流器的内部流场、直观地体现旋流器分离效果与方便观察,实验所用旋流器样机制作材料选用有机玻璃。实验装置如图 3 所示,溢流管部分采用的是可拆卸结构,可满足对不同规格铜网的替换更加节约资源。实验所用铜网分别为 100 目($150\mu\text{m}$)、200 目($75\mu\text{m}$)、300 目($48\mu\text{m}$),为了增加实验的对比度,最后一组实验采用传统的无孔溢流管。

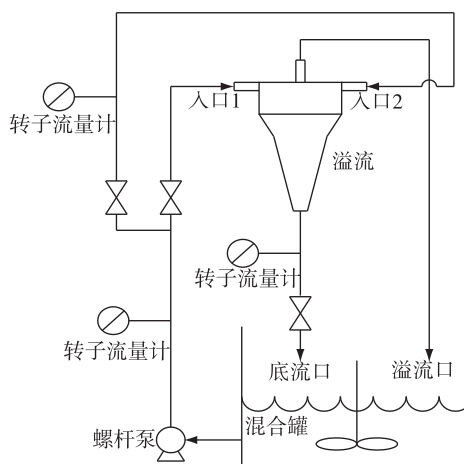


图 3 分离试验流程图

Fig.3 Flowchart of separation test

实验流程为:①将装有 100 目铜网的溢流管转入旋流器。将油田含油污水倒入混合罐中,并搅拌均匀;②启动电机,调节控制器频率,控制螺杆泵转速,调节分流比至 3%;③调节入口流量,使其从 $3.5\text{m}^3/\text{h}$ 逐渐增加到 $4.4\text{m}^3/\text{h}$,每个数据记录点维持旋流器稳定 3~5min 后,记录旋流器入口、旋流器底流和旋流器溢流口相关数据,选取最高分离效率时所对应的入口流量;④将流量调节至步骤 3 最后得出的入口流量,改变分流比,使其从 1.13% 逐渐增加至 8.26%。记录并整理得出分离效率最高时所对应的分流比;⑤将分流比调节至步骤 3 得出的分流比。从小至大改变流量,记录整理压降情况;⑥更换不同孔径的铜网的重复步骤 1~5。

3 结果与讨论

3.1 分流比对分离效率的影响

图 4 是在不同方案下的超疏水材料与水力旋流器组合实验所得出的分离效率与分流比之间的变化曲线。将入口流量设置为 $3.9\text{m}^3/\text{h}$,调节分流比。

随着分流比的逐渐增大,分离效率呈现先变大后变小的趋势。在分流比达到 3.27% 时,4 种方案的分离效率基本都达到各自的峰值。当分流比在 1%~3% 之间时,与实验用含油污水的含油体积分数相近,油相无法很好的从溢流口分离出去。随着分流比的增加,溢流口流量也随之增加,导致更多的水相从溢流口流出,间接减少了底流水相体积分数,从而导致分离效率下降。

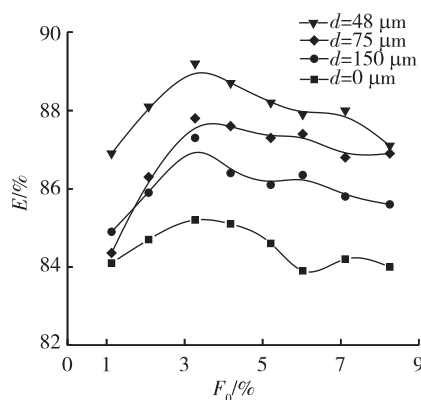


图 4 分离效率与分流比之间的变化曲线

Fig.4 The curve between separation efficiency and split ratio

经比较发现在结构尺寸不变的情况,水力旋流器的最佳分流比是一个特定的值。在使用超疏水材料的 3 个方案均比未使用的分案分离效率高。同时在使用超疏水材料的 3 个实验中随着铜网孔径的逐渐增加,其分离效率总体上是呈下降趋势。分离效率最高的是采用 300 目(孔径 $48\mu\text{m}$)的实验方案,其分离效率比未安装超疏水材料高了 4.11%。经过表面处理以后,水在铜网表面张力降低了;固体表面张力越小固体表面的润湿难度就会越大,因此可以很好的阻挡水相进入溢流管。随着铜网孔径的增加,铜网表面的润湿性会持续下降,使得固体表面更加容易被水相润湿,致使更多的水流入溢流管,降低分离效率。

3.2 入口流量对分离效率的影响

调节分流比至 3.27%,在不同方案下的超疏水材料与水力旋流器组合实验所得出的分离效率与旋流器入口流量之间变化规律如图 5 所示。随着入口流量的逐渐增大,4 种方案的分离效率总体是先增加,后减小。4 种方案基本都在入口流量为 $3.9\text{m}^3/\text{h}$ 时取得最大分离效率。使用超疏水材料的 3 种方案的分离效率均高于未使用超疏水材料的方案。表明超疏水材料制成的溢流管对提高水力旋流器分离

效率具有一定的效果。随着旋流器入口流量的增加,入口压力也随之增加,致使油滴的切向速度增加,从而形成更难分离的乳浊液。同时还发现,在本实验中随着做为超疏水材料底料的铜网孔径的逐渐增加,其分离效率是有所降低的。因此在本实验中采用 300 目(孔径 $48\mu\text{m}$)铜网的水力旋流器的分离效率最高,其分离效率比没安装超疏水材料的方案提高了 3.95%。

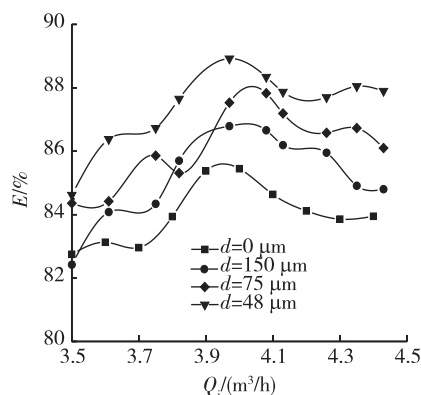


图 5 入口流量与分离效率变化曲线

Fig.5 The curve between inlet flow and separation efficiency

3.3 压降与入口流量的关系

如图 6 在不同方案下的超疏水材料与水力旋流器组合实验所得出的入口流量与压力降之间的变化曲线。从图中可以看出,在分流比确定时,随着入口流量的增加,压降都是增加的只是增加的幅度不同。因为入口流量不断增大,入口尺寸没有变化,导致入口流速在不断增加。含油污水进入旋流体内部以后,涡流加剧,液滴在旋流器内部受到的离心力增加。总体而言对于四种方案的压力损失梯度的差别不大,其中没有使用超疏水材料的方案的压力损失最小,因为含油污水在铜网上的空隙间的速度矢量发生变化,而这种变化会随着铜网孔径的增加而逐渐加剧。也因此产生了如图 6 所示孔径越大压降越大的情况。说明采用超疏水材料制作的溢流管的不足之处。

4 结 论

1)通过试验研究表明,在入口流量为 $3.9\text{m}^3/\text{h}$,分流比为 3.27% 的情况下,使用 300 目(孔径 $48\mu\text{m}$)铜网改进的溢流管方案较未使用超疏水材料的溢流管相比,其分离效率从 84.8% 提高至 88.9%。经新型超疏水材料改进的溢流管能确实有

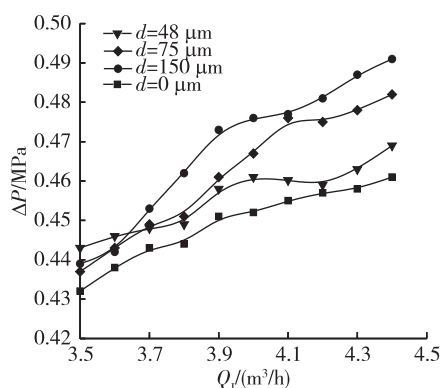


图6 入口流量与压力降之间的变化曲线

Fig.6 The curve between inlet flow and pressure drop

效地提高旋流器分离效率,验证了超疏水材料在水力旋流器上应用的可行性。

2)在相同材质与操作参数下,随着铜网孔径的增加,铜网表面更容易被水润湿,水滴也就更容易渗入溢流管。因此铜网孔径越大分离效率越低,在本实验中采用300目(孔径 $48\mu\text{m}$)铜网的分离效率最高。

3)使用改进后的溢流管会对旋流器压降产生一定的影响,较传统溢流管平均压降增加了2.3%。

参考文献:

- [1]邵悦,赵会军,王小兵.水力旋流器油水分离数值模拟与实验研究[J].常州大学学报(自然科学版),2013,25(2):51-55.
- [2]TUTEJA A, CHOI W, MABTY A. Designing superoleophobic surfaces[J].Science,2007,318:1618-1622.
- [3]刘明芝.超疏水表面制备及其在海水中的腐蚀行为研究[D].南昌:南昌航空大学,2012.
- [4]倪玲英.溢流口直径多原油预分水旋流器性能的影响[J].石油化工设备,2009,29(2):8-9.
- [5]GUO W, ZHANG Q, XIAO H B. Cu mesh's superhydrophobic and oleophobic properties with variations in gravitational pressure and surface components for oil/water separation applications [J]. Applied Surface Science,2014,314:408-414.
- [6]周继根.超双疏表面制备及其润湿性研究[D].青岛:青岛理工大学,2010.
- [7]李玉星,冯叔初,李安星,等.水力旋流器压降及压力分布特性的数值模拟[J].流体机械,2002,30(10):15-19.
- [8]CRIK C R, GIBBINS J A, PARKIN I P. Superhydrophobic polymer-coated copper-mesh membranes for highly efficient oil-water separation [J]. Journal of Materials Chemistry A,2013,19(1):5943-5948.

(责任编辑:殷丽莉)