

空气冷却器入口注剂喷射混合结构的流动特性

金浩哲¹, 刘文文¹, 偶国富¹, 李海涛², 王超¹

(1. 浙江理工大学流动腐蚀研究所, 杭州 310018; 2. 海军工程大学舰船与海洋学院, 武汉 430033)

摘 要: 空气冷却器入口处注剂喷射混合结构内的流动特性对注剂与主流的充分混合及空气冷却器的使用寿命都起到决定性作用。根据注剂喷射混合结构内的多相流流型特征和入口条件,以混合模型为多相流模型,以 Realizable $k-\epsilon$ 模型为湍流模型,对混合结构内的流动特性进行了计算流体力学模拟。数值模拟结果显示:在注水区,所选注剂喷嘴具有良好的混合效果,同时避免了垂直注射给管道侧壁带来的冲蚀;在混合区,叶片一、叶片三的背流面形成了多相流漩涡,漩涡对多相流相间的扰动进一步增强了相间的混合;当距离混合器出口超过混合器长度 2 倍时,相间混合逐渐减弱,管道中的水相分率不再发生明显改变;随着叶片半径的增大,在混合器下游相应位置上湍流强度随之增加,混合区剪切力超过 15.8 Pa 时,需考虑升级混合器材质或者增加耐冲蚀衬套。

关键词: 空气冷却器;喷射混合;静态混合器;多相流;数值模拟

中图分类号: TQ022.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2018)01-0069-06

0 引言

空气冷却器简称空冷器,在很多行业都有大量使用,其内部流动介质复杂多变,如在我国现行的石油化工行业中,加氢反应流出物空气冷却器(Reactor effluent air coolers, REAC)系统主要输送并冷却反应产物,产物是以气液相为主的多相流动介质,且气相中含有 NH_3 、 H_2S 和 HCl 等杂质。空冷器的冷却作用会促使这 3 种杂质反应生成 NH_4Cl 和 NH_4HS ^[1]。多相流夹杂的铵盐颗粒会漂移沉积在加氢 REAC 的管壁上。多相流中的水相会使管壁上的铵盐发生潮解,生成腐蚀性的铵盐溶液。如果得不到及时清理,加氢 REAC 可能会因为管壁被腐蚀而导致装置失去控制,进而演变成泄漏甚至爆炸。工业上为了解决空冷器管束中铵盐沉积带来的腐蚀泄露问题,通常会在 REAC 系统的上段注水来进行冲洗,并在空冷器的入口处增设静态混合器来加强注剂与主流的混合。

国内外针对这种混合结构的研究主要集中在静态混合器上。吴剑华等^[2]运用 CFD 软件数值模拟了静态混合器内四叶片组合的紊流换热过程,并将结果与 SK 型静态混合器进行了对比,结果表明在 $10^4 < Re < 10^5$ 范围内,传热效率提高了 20%。Zhan 等^[3]使用具有不同颜色和性质的二元颗粒,研究固体颗粒在连续碰撞静态混合器中的混合过程,通过图像分析方法测定样品图像中的对比色,用以定量分析组分浓度,从而评价不同颗粒的混合效果。Zidouni 等^[4]使用 Euler-Euler 方法模拟螺旋静态混合器中的气-液气泡流,在混合器元件内的给定平面处采用超快速 X 射线电子束测量气体体积分数,对模型进行实验验证。Murasiewicz 等^[5]用计算流体力学方法研究了 Kenics 型静态混合器内的流场特性,通过计算得到结果之后与 LDA 实际测量结果对比,发现数值模拟方法的结果是可靠的,即计算流体力学方法研究静态混合器内的流动特性是可行的。Byrde 等^[6]则通过数值模拟比较了 KMX 型和 SMX 型静态混合器

收稿日期: 2017-12-07 网络出版日期: 2017-12-27

基金项目: 国家自然科学基金委员会-神华集团有限公司煤炭联合基金项目(U1361107);浙江省自然科学基金项目(LY17E060008);浙江理工大学研究生创新研究项目

作者简介: 金浩哲(1982-),男,河南周口人,副教授,博士,主要从事多相流沉积与冲蚀方面的研究。

通信作者: 偶国富, E-mail: ougf@163.com

的混合效果,希望能找到两种混合器各自的适用范围和优缺点。SK型、SV型、Kenics型等静态混合器依赖于固定在管道内的折流混合元件来实现管道内的气液两相流体混合,其内部的折流元件一般结构复杂,内部的流动包含大量旋流、多相湍流、液滴破碎、气液掺混等复杂过程,理论研究和实验观测都很困难,目前工程上多采用CFD和实验测量相结合的方法^[7-13]。

在空冷器注剂喷射混合结构这一研究领域,上端来流的均匀性对空冷器系统长周期安全运行至关重要,但现有研究较少。本课题组前期已对一种内置式叶片混合器的内流动特性进行了数值模拟研究^[14]。为深化注剂端的研究,本文在此基础上,继续采用CFD方法对空冷器系统前端注剂喷射混合结构中的多相流流动特性进行研究。

1 数值模型

1.1 工艺流程及物理模型

本文研究某企业的加氢系统的空气冷却器,该系统的空气冷却器工艺流程如图1所示。在工艺流程中,原料油和催化剂加热后在加氢反应器发生反应。随后,反应生成物流出反应器底部,即为反应流出物。反应流出物分别经过换热器换出部分热量、空气冷却器冷却,再进入高压分离器分离出循环氢气、油以及含硫污水。分离产物或循环使用,或送往下一步处理环节。

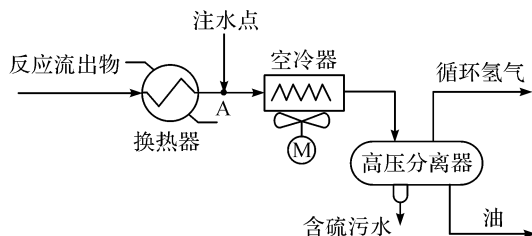


图1 某加氢系统空气冷却器工艺流程示意图

因反应流出物含有少量的 NH_3 、 H_2S 和 HCl ,为避免其生成的铵盐在空冷器中结晶造成垢下腐蚀,需要在空冷器前设置工艺注剂(注水)点A。注水量、注水处管型及尺寸可以根据API 932-B标准的规定和工艺参数来计算。然而API标准没有对非常重要的注剂与反应流出物的混合特性做出说明,存在一定缺陷。本文针对某空冷器前的工艺注剂点处的混合特性进行数值模拟,其注剂T型管尺寸分别为:主流管径 $d_1 = 123 \text{ mm}$,支流管径 $d_2 = 20 \text{ mm}$ 。坐标轴原点及坐标轴如图2所示,图中 Q 为流量, v_1 为主管道来流平均速度, v_2 为支管注剂

平均速度。为使计算结果不受实际计算区域进出口多相流边界条件选取的影响,主流管道和支流管道的管道长度设为 $50d_1$ 。在进行CFD数值模拟之前,运用ICEM分区划分了计算域网格,在注射端和混合段进行了加密处理;并对40万、70万、100万这3套网格进行无关性验证,对比计算后的水相体积分数结果,最终确定工艺注剂T型管的网格数量为70万。

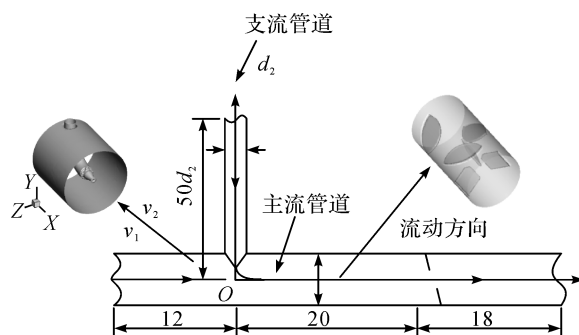


图2 T型管几何模型

固定在混合器管壁上的混合元件由叶片和整流挡板两部分组成。其中混合器长度 L 为 $1.3d_1$,叶片与整流挡板的厚度均为 8 mm ,整流挡板内部倒角 45° ,倒角距离两边均为 10 mm ,叶片与管壁垂直,叶片与 YZ 平面的夹角为 13° ;整体结构上,3块叶片等角度螺旋分布,与3块整流挡板成交叉对应状态。

1.2 模型方程和边界条件

加氢流出物系统含气相、油相和水相等多相介质,工艺注剂冲洗水从喷射结构的喷嘴喷出后与主流的介质一起经静态混合器混合,形成气、油、水多相流体流动。本文采用混合模型来描述主流与支流的流体介质的气液混合过程,模拟主流与支流的多相介质混合效果及边缘漩涡效应。湍流模型选择Realizable $k-\epsilon$ 模型。

主流气、油、水来入口采用速度进口边界条件;支流入口采用流量入口边界条件,注水量为 1 t/h 。出口边界设置为自由出流,按充分发展的管流条件处理;整个计算域的壁面采用无滑移边界条件,选取标准壁面函数处理壁面湍流。数值方法采用有限体积法。不同方程和项采用不同离散格式和算法,其中连续方程、湍流动能方程和动量方程等采用二阶迎风格式,湍流耗散率方程采用一阶迎风格式以减少数值扰动。首先利用Aspen软件,基于倒序逆推法获得空冷器入口注剂点位置的多相流的物性参数,见表1。

表 1 空冷器注剂点位置物性参数

参数	气相	油相	水相
体积流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	234.3	1.9	0.6
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	26.1	676.3	929.3
质量分数/%	76.4	16.3	7.3
黏性/($\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$)	1.32×10^{-5}	2.62×10^{-4}	1.88×10^{-4}

2 结果与讨论

文献[15-16]已经使用了本文采用的数值模拟方法模拟了在环道式多相流实验装置中开展的叶片式混合器的压降试验过程,实验结果和数值模拟结果吻合较好,故本文采用同样的数值模拟方法。

2.1 注剂喷嘴对混合效果的影响

为了使工艺注剂与主相介质充分混合,提升工艺注剂相与反应流出物多相流的混合效果,降低结晶相结晶沉积堵塞管束和多相流冲蚀的风险,增加工艺设备的使用寿命,所以加氢 REAC 的注剂管段采用喷嘴结构代替了原来的 90° T 型管垂直注射结构。

图 3 和图 4 分别显示的是注剂喷嘴下游 $Z=0$ mm 截面的水相分率和湍流强度分布云图。由图 3 可知,水从注剂管段经喷嘴喷出后具有很好的喷射效果,水相能够集中分布在管道的轴心位置,从而避免了采用 90° T 型管垂直注射时给下侧壁面带来的冲蚀。因为经喷嘴喷射出的水流速度大于其它各相速度,产生的相间黏性力会使管道中油、气、水三相的扰动增强。由图 4 可知,注剂水从喷嘴喷出后,主流管道中的湍流强度分布情况发生了变化,数值上由 25.3 增大到 126.4 左右,从而有助于注剂水与主流管道多相流间的混合。

水相分率/%

图 3 水相分布云图($Z=0$ mm)

湍流强度/%

图 4 湍流强度分布云图($Z=0$ mm)

2.2 混合效果描述

图 5 为 $Y=0$ mm 和 $Z=0$ mm 截面内,混合器内部及出口区域的流速分布图。由图 5 可知,混合器上游的流线近乎平行,当多相流流经叶片和整流挡板后,多相流流线迅速改变,相应的流速也迅速变大。混合器内部沿 x 轴方向的最大流速达到 17 m/s,远大于主流管道的初始流速 5.8 m/s,接近初始流速的 3 倍。由于叶片迎流面与背流面两侧具有不同的压力,导致叶片一和叶片三在背流面形成与流动方向相反的漩涡,最大反向流速为 -5 m/s,通过漩涡对多相流相间的扰动从而增强混合器的混合效果。

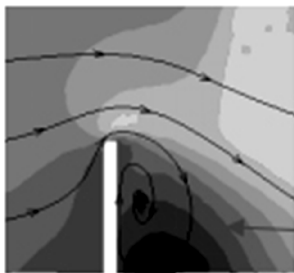
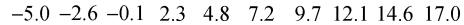
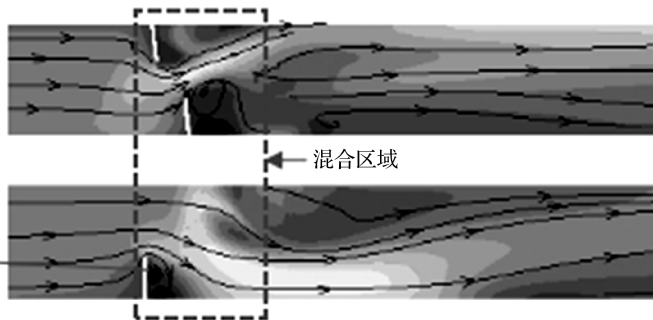
速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a) $Y=0$ mm 纵截面的速度分布(b) $Z=0$ mm 纵截面的速度分布

图 5 多相流管道纵截面的速度分布

图 6 为混合器进出口管道在指定截面上的水相分率云图。其中,图 6(a)为混合器进口管道所在区域,图 6(b)为出口管道所在区域。由图 6(a)可知,水相分率最高的位置位于管道底部,这是由于在多

相流进入混合器前,由于重力的作用,水相密度大会沉积于管道的底部,气、油、水三相分布不均;进入混合器后,在内部混合元件的扭转和转动作用下,会促使管道底部高浓度区的水相向管道中心移动,多相

流流速及湍流强度也随之迅速提高。对比 6(a)、图 6(b)可知,经过混合器混合之后,高浓度区的水相向低浓度区发生了转移,均匀性得到了明显改善。

定义参数 λ 为混合器出口沿程距离 L 与混合器长度 l 的比值。由图 6(b)可知,虽然混合器出口 $0 \sim 320$ mm 这个区间已经不存在混合元件对多相流的扰动,但由于此处存在上游混合器扰动带来的多相流漩涡以及高湍动能区,三相间的混合依旧显著。在混合器出口 320 mm 之后($\lambda \geq 2$),由于多相流漩涡与高湍动能区的消失,相间混合也随之逐渐减弱,管道中的

水相分率不再发生明显改变,三相分布趋于平稳。

不同横截面水相分布云图如图 7 所示。为了呈现出叶片式混合器的完整混合效果,截取 $Y=0$ 平面和 $Z=0$ 平面的水相分布云图,并从叶片式混合器入口上游 $1.5l$ 处,下游出口 $6l$ 处进行截断分析。从图 7 可清晰看出混合器入口上游水相分率在 0.002 到 0.015 之间;混合器下游出口 $2l$ 之后,水相分率集中分布在 0.005 到 0.008 之间。即反应流出物多相流介质经过混合器内部混合元件扰动之后,水相分布逐渐均匀化,油、气、水三相混合良好。

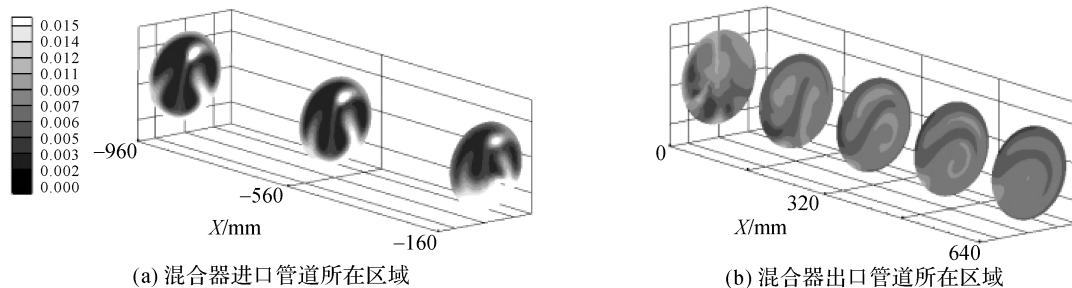


图 6 不同横截面水相分率云图

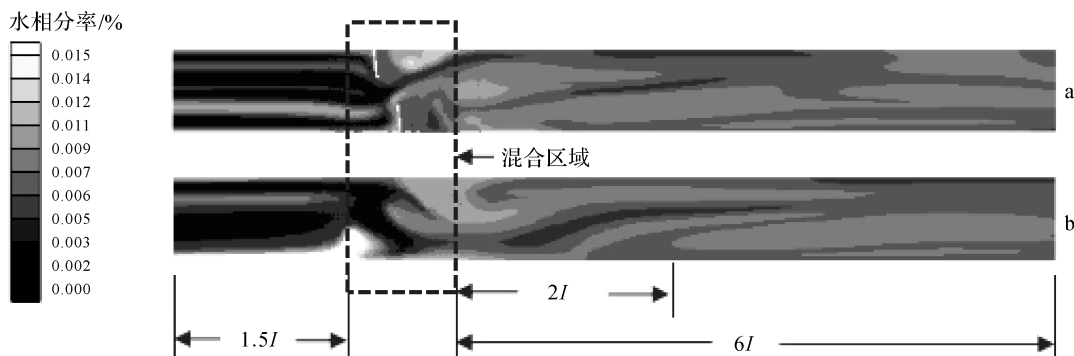


图 7 不同纵截面水相分率云图

注:a. $Y=0$ mm 水相分布云图;b. $Z=0$ mm 水相分布云图。

2.3 叶片半径对混合效果的影响

通过改变静态混合器的叶片半径来研究多相流通过静态混合器之后的混合效果,揭示相同边界以及入口参数条件下静态混合器的叶片半径对混合效果的影响规律,为同类设备的工艺放大、优化设计、优化运行提供理论支撑。表 2 为相同叶片夹角,不同叶片半径的静态混合器模型参数。

表 2 不同叶片半径的混合器模型

型号	叶片半径/mm	叶片与 XZ 面的夹角/(°)
1	36	13
2	46	13
3	56	13

2.3.1 湍流强度与叶片半径的关系

湍流强度 I 按下式计算: $I = u'/u_{\text{avg}}$ (u' 为速度

波动, u_{avg} 为平均速度)。为了研究湍流强度与叶片半径的关系,分别对叶片半径为 36 、 46 、 56 mm 的 3 种结构混合器进行 CFD 模拟,后处理过程中分别截取混合器下游出口 $x=160i$ mm ($i=-2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$) 处进行湍流强度分析。图 8 为不同叶片半径的 3 种混合器管道中多相流在上游距离 $2l$ 和下游距离 $4l$ 之间的指定位置截面上湍流强度变化的折线图。从图 8 中可以看出,随着叶片半径的增加在混合器下游相应位置上湍流强度也随之增加。其中叶片半径为 36 mm 的混合器,湍流强度峰值为 122 , 出现在 $x=160$ mm 的截面处;叶片半径为 46 mm 的混合器,湍流强度峰值为 163 , 出现在 $x=0$ mm 的截面处;叶片半径为 56 mm 的混合器,湍流强度峰值为 214 , 出现在 $x=0$ mm 的截面处。随着流体

逐渐远离混合管段,由于缺少叶片的扰动作用,湍流强度总的趋势上呈现逐渐减弱状态。

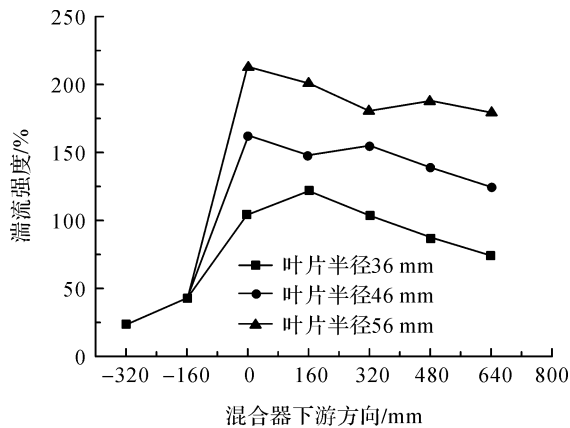


图 8 湍流强度折线图

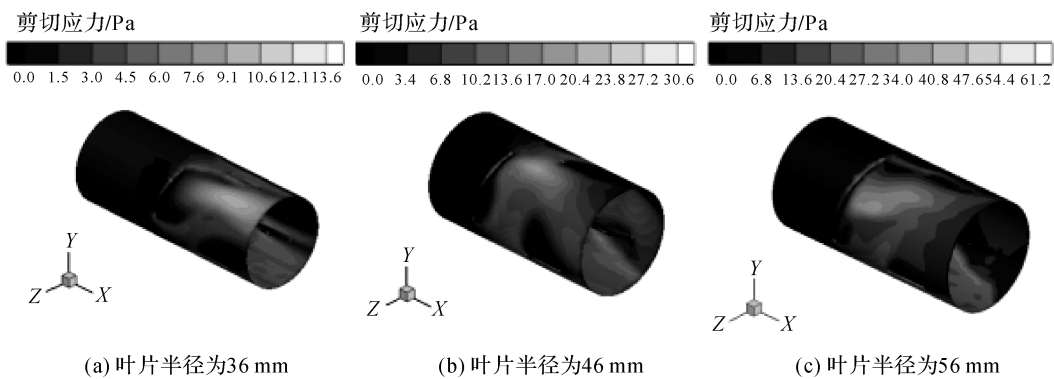


图 9 混合段剪切应力分布

相关文献显示,REAC 系统冲蚀实验的临界剪切应力不应超过 15.8 Pa^[16],在此范围内可以保证设备的长周期稳定运行。图 10(a)、(b)为叶片半径为 46、56 mm 的混合器中剪切应力大于 15.8 Pa 的分布云图,从图 10(a)中可以看出,叶片一和混合器管壁处的剪切应力达到了 25.7 Pa;从图 10(b)可以

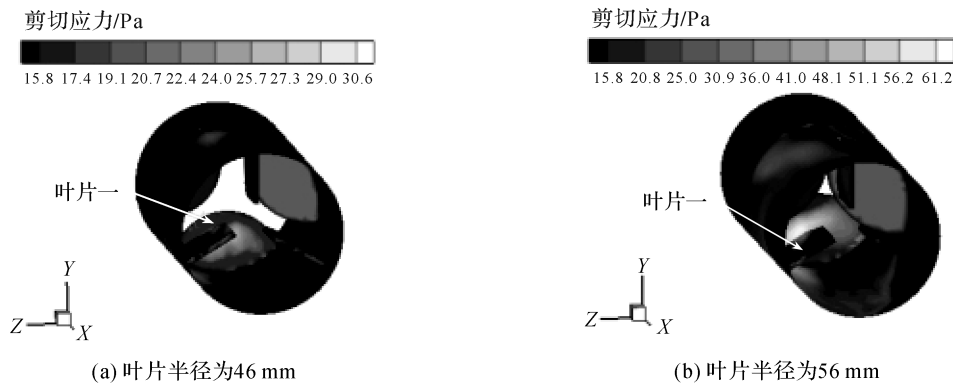


图 10 剪切应力大于 15.8 Pa 的位置

3 结 论

运用 CFD 模拟技术,计算加氢 REAC 注剂喷

2.3.2 剪切应力与叶片半径的关系

加氢反应流出物在流经混合器叶片、整流挡板、筒壁时会产生剪切应力,又因为其具有腐蚀性,如果剪切应力过大,会对混合器单元产生腐蚀基础上的冲蚀减薄。图 9 为 3 种不同叶片半径长度的加氢 REAC 系统中混合单元的剪切应力分布情况,由图可知,当多相流流经混合器时,多相流在混合器叶片的扰动下,剪切应力也随之变大。其中叶片半径为 36 mm 的混合器,壁面与叶片上最大的剪切应力为 13.6 Pa;叶片半径为 46 mm 的混合器,壁面与叶片上的最大剪切应力为 30.6 Pa;叶片半径为 56 mm 的混合器,壁面与叶片上的最大剪切应力为 61.2 Pa。可以发现,随着叶片半径的增大,混合器当中的最大剪切应力也随之增大。

看出,叶片一和混合器管壁处的剪切应力达到了 51.1 Pa,均超过了长周期稳定运行的临界值。因此,在混合器原有结构不变的情况下,需要对混合器材质进行升级,建议由原来的碳钢材质改为耐冲蚀的 Incoloy 825 材质,或者给混合器加装不锈钢衬套,来提高管道失效的临界剪切应力。

射混合结构的内流动特性。分析注剂喷嘴的喷射效果、混合器内多相流动的流动速度、湍流强度、水相分率分布等流动参数,得到以下结论:

a) 注剂喷射结构不仅具有更好的混合效果,而且避免了注剂 T 型管垂直注射给下侧壁面带来的冲刷腐蚀;多相流流经混合器时,叶片一、叶片三的背影面形成了直径大小为 $0.3d_1 \sim 0.5d_1$ 的多相流漩涡,最大反向流速为 -5 m/s ,漩涡对多相流相间的扰动可进一步增强三相间的混合,对提高混合器的混合效果具有促进作用。

b) 定义混合器出口沿程距离 L 与混合器长度 l 的比值为 λ ,根据 CFD 模拟结果表明,当 $\lambda \geq 2$ 时,由于多相流漩涡与高动能区的消失,相间混合也随之逐渐减弱,油、气、水三相分布趋于平稳,管道中的水相分率不再发生明显改变;

c) 叶片半径为 46、56 mm 的混合器,在混合区剪切力过大,均超过了系统长周期稳定运行的临界冲刷剪切应力 15.8 Pa,需考虑升级混合器材质或者增加耐冲刷的衬套,来提高管道失效的临界剪切应力。

参考文献:

- [1] 偶国富,王宽心,谢浩平,等. 加氢空冷系统硫化氢铵结晶规律的数值模拟[J]. 高校化学工程学报,2013,27(2):355-359.
- [2] 吴剑华,张静,张春梅,等. 四叶片组合静态混合器湍流传热性能的数值模拟分析[J]. 过程工程学报,2009,9(1):7-11.
- [3] Zhan M, Sun G, Lu Y, et al. Characterization of mixing of binary particles in a continuous colliding static mixer[J]. Powder Technology,2016,291:448-455.
- [4] Zidouni F, Krepper E, Rzehak R, et al. Simulation of gas-liquid flow in a helical static mixer[J]. Chemical Engineering Science,2015,137:476-486.
- [5] Murasiewicz H, Jaworski Z. Transient CFD simulations of turbulent liquid-liquid flow in a kenics static mixer radial and tangential velocities[J]. Polish Journal of Chemical Technology,2009,11(2):36-40.
- [6] Byrde O, Sawley M L. Optimization of a kenics static mixer for non-creeping flow conditions[J]. Chemical engineering journal,1999,72(2):163-169.
- [7] 赵建华,李彦强,黄次浩,等. 静态混合器流场的数值模拟及 PIV 实验研究[J]. 石油矿场机械,2004,33(z1):51-53.
- [8] 赵建华,黄次浩,郑学岭. 静态混合器气液两相流压降的数值模拟及实验研究[J]. 精细化工,2003,20(5):317-320.
- [9] 张鸿雁,陈晓春,王元. 内置翼片管式静态混合器混合效果的大涡模拟[J]. 西安交通大学学报,2005,39(7):673-676.
- [10] Sotiropoulos F, Ventikos Y. Flow through a curved duct using nonlinear two-equation turbulence models[J]. Aiaa Journal,2015,36(7):1256-1262.
- [11] Jovanovic A, Pezo M, Pezo L, et al. DEM/CFD analysis of granular flow in static mixers[J]. Powder Technology, 2014,266:240-248.
- [12] Regner M, Östergren K, Tragardh C. Effects of geometry and flow rate on secondary flow and the mixing process in static mixers—a numerical study[J]. Chemical Engineering Science,2006,61(18):6133-6141.
- [13] Wojtowicz R, Talaga J. Identification of turbulent liquid flow in a tubular reactor with different width baffles[J]. Chemical Engineering Communications,2016,203(2):150527094519003.
- [14] 偶国富,郑智剑,金浩哲. 叶片式静态混合器多相流动特性的数值分析[J]. 高校化学工程学报,2016,30(1):40-47.
- [15] 偶国富,金浩哲,曹海彬,等. 环道式多相流冲刷试验装置:CN 200710067815.1[P]. 2009-05-06.
- [16] 偶国富,李鹏轩,裘杰,等. REAC 出口管道结构优化的数值模拟[J]. 浙江理工大学学报,2009,26(3):364-369.

The flow characteristics in jet mixing structure of air cooling system

JIN Haozhe¹, LIU Wenwen¹, OU Guofu¹, LI Haitao², WANG Chao¹

(1. Institute of Flow-Induced Corrosion, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The flow characteristics in jet mixing structure of air cooling system play a decisive role in the mixing of the injectors with the main stream and the service life of the air cooling. Based on the geometrical feature and the initial conditions of multiphase flow, the Mixture and Realizable $k-\epsilon$ model were used to simulate the inner flow characteristics of jet mixing structure. The results show that: in the injected area, the jet not only benefits to the mixing effect, but also avoids the erosion at the bottom of tube caused by vertical flow. In the mixing area, a multiphase flow vortex appeared at the back surface of blade 1 and 3, and the disturbance caused by multiphase flow vortex can further enhance mixing effect of three phases. When the outlet distance of the mixer exceeds 2 times the length of the mixer, the mixing between phases effect weakened gradually and the water phase fraction tend to be stable in the pipeline. The turbulent intensity at downstream of mixer enhanced with the increase of blade radius, when the shear stress is over 15.8 Pa, it is suggested to add stainless steel liners to the mixer or use higher strength materials.

Key words: air cooling system; jet mixing; static mixer; multiphase flow; numerical simulation

(责任编辑:康 锋)