

酸化返排酸性气体动态喷淋净化装置

王方祥,潘艳萍,张磊,张宝财,杨东伟,管建军

中国石油集团渤海钻探工程公司井下技术服务公司 天津 300280

通讯作者:Email:wangfangxiangcnpc@126.com

项目支持:中国石油集团渤海钻探工程有限公司重大技术研究项目“酸性气体、VOCs 有害气体净化除臭技术研究”(2019ZD13K-01)

引用:王方祥,潘艳萍,张磊,等. 酸化返排酸性气体动态喷淋净化装置[J]. 油气井测试,2021,30(4):13-18.

Cite: WANG Fangxiang, PAN Yanping, ZHANG Lei, et al. Dynamic spraying purification device for acid gas flowing back after acidizing operation [J]. Well Testing, 2021,30(4):13-18.

摘要 油气井酸化施工后,井内返排液体中夹带的酸性刺激性气体,经静态喷淋净化后,均未达到排放标准,整体净化效率低,严重污染环境,威胁人身安全。为提高喷淋净化装置对酸性气体的净化效率,研究了一种以叶轮为主要部件的动态喷淋净化装置。通过理论计算气液接触面积,验证了动态喷淋装置净化气体的高效性。采用流体力学计算方法,对动态喷淋的叶轮结构进行了优化设计,优选出叶片数为6个、倾斜角为40°的叶轮,获得16 r/min 转速的动态喷淋净化装置。大港油田X井采用该装置处理后的酸性气体净化效率由49.06%提高到95.88%,较静态喷淋提高了95.43%,满足油气田作业现场对酸性气体的净化要求,实现了作业现场小型、喷淋效果高效的目的,具有广泛的实用性。

关键词 酸化;酸性气体;动态喷淋;净化装置;叶轮;数值模拟;净化效率;排放标准

中图分类号:TE375 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.04.003

Dynamic spraying purification device for acid gas flowing back after acidizing operation

WANG Fangxiang, PAN Yanping, ZHANG Lei, ZHANG Baocai, YANG Dongwei, GUAN Jianjun

Downhole Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin 300280

Abstract: The acidic irritant gas contained in the liquid flowing back from the oil&gas well after the acidizing operation usually fails to meet the emission standards after being treated by static spraying purification. The low overall purification efficiency leads to serious environmental pollution and personal safety threats. To improve the efficiency of the purification system, a dynamic spraying purification device with impeller as the main component was designed. By theoretical calculating the gas-liquid contact area, the high gas purification efficiency of the dynamic spraying device was verified. With the hydrodynamic calculation method, the impeller structure was optimized. The impeller with 6 blades and 40° inclination angle was selected to form the dynamic spraying purification device with the optimal rotation speed of 16 r/min. Since this device has been used in well X of Dagang Oilfield, the purification efficiency of acid gas is increased from 49.06% to 95.88%, 95.43% higher than that of the static spraying purification treatment, meeting the requirements for acid gas purification and achieving the goal of small footprint and high purification efficiency at wellsites, which has a wide range of practicability.

Keywords: acidification; acid gas; dynamic spraying; purification device; impeller; numerical simulation; purification efficiency; emission standard

在油气井井下作业过程中,酸化施工之后,井内返排的液体中夹带着HCl、HF、H₂S等酸性刺激性气味的气体,严重污染环境,威胁人身安全^[1-3]。而喷淋净化装置通过在塔器内向下喷淋碱性液体,与向上运行的酸性气体进行中和反应,实现净化效果^[4]。喷淋装置的净化效率取决于气、液两相的接触面积^[5]。但受装置整体体积和运输条件的限制,不可能无限增大接触面积,特别是油田井下的应用

环境,如果依靠增大装置的体积增大气液两相的接触面积,就必须增加装置的直径和高度,这样不仅增加了装置的加工成本,而且不便于集成和运输^[6]。因此,研究小型、高效的喷淋净化装置势在必行。

薛景岩等^[7]采用合理布置导流板的方法改进烟气的流动,以提高气液比分布均匀性,研究了导流板式喷淋塔内多相流动与传质过程。Chen Z.

等^[8]采用欧拉-拉格朗日方法对喷淋塔中导流板、托盘等进行了气液两相数值模拟,可预测塔器内的气液流动行为,从而提高气液流动的均匀性。Liu D. 等^[9]结合实验和数值模拟研究了导流板对喷淋塔内流场分布和净化效率的影响,通过优化导流板避免了由于单入口引起的回流。王筱蓉等^[10]从喷淋方向入手,研究了I型喷淋装置内部流场的特性,通过数值模拟优选最佳喷淋方向,以提高净化效率。钱付平等^[11]研究了喷淋塔内喷嘴的布置方式和喷淋层数对气流分布和净化效果的影响,其结论可指导喷淋塔的设计。

由以上分析可见,目前的学者们主要是对喷淋净化装置内的关键部件和喷淋方式进行设计,以达到提高净化效率的目的。本文创新性的提出了动态喷淋的净化方法,设计了动态喷淋的结构,从理论分析的角度确定了动态喷淋的高效性,保证研究的理论可行性,借助数值模拟手段优化了驱动叶轮的结构,最后通过综合除气试验验证了动态喷淋装置的净化效率。

1 动态喷淋结构设计

在不增加动力设备的条件下,依靠流体的动力带动叶轮的旋转,从而带动喷淋管的旋转,实现动态喷淋的效果,设计的动态喷淋结构如图1所示。

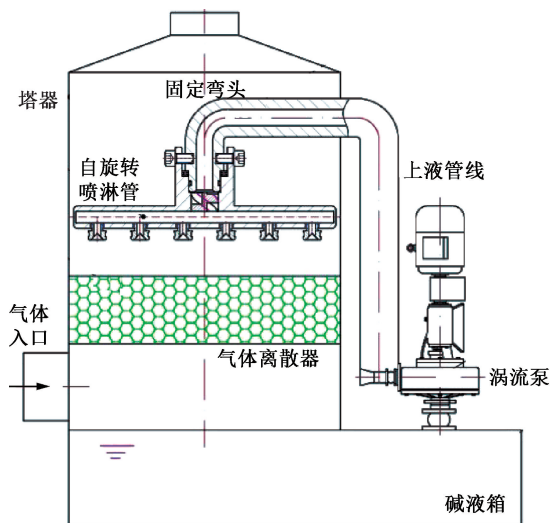


图1 动态喷淋结构示意图

Fig.1 Structure of dynamic spraying device

动态喷淋净化装置包括塔器,固定弯接头,自旋转喷淋管,上液管线,气体分散器,涡流泵,气体入口,碱液箱等。工作时,酸性气体由气体入口进入塔器内,向上经过气体分散器分散成微小气流,分散到塔器内。启动涡流泵,将碱液箱内的碱液通

过上液管线输送至固定弯接头内,由固定弯接头与自旋转喷淋管组成的内腔流过叶轮。叶轮与自旋转喷淋管焊接为一体,自旋转喷淋管与固定弯接头通过轴承连接。碱液流过叶轮时,在叶轮的旋流作用下,使自旋转喷淋管在无需外加动力的情况下产生自旋运动。流过叶轮后的碱液通过分支管向微细扇形喷嘴流动,经过微细扇形喷嘴发散喷出(图2),形成水雾,覆盖向上飘散的酸性气体,产生中和吸收作用。净化后的气体由塔器顶部的气体出口流出。由于自旋转喷淋管的旋转,使得分支管在旋转一周后均匀的扫过塔器内的所有区域,不存在碱液覆盖的盲区,形成动态的气液接触,从而增加气液的接触面积,保证动态喷淋净化装置对酸性气体的净化效率。

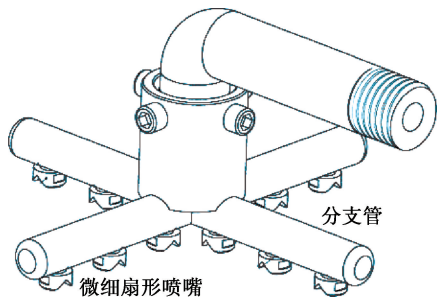


图2 旋转部件立体结构示意图

Fig.2 Structure of dynamic spraying device rotating components

2 动态喷淋过程理论分析

动态喷淋的设计主要是使喷淋管旋转运动,旋转的喷淋液柱主要起到2个作用:(1)喷淋液柱在旋转时,由于受到气体阻力和旋转惯性的作用,液柱并不保持原始的直线状态,而是空间曲线状态,这种流体状态无疑会增加动态气、液接触面积,从而提高对酸性气体的净化效率。(2)喷淋液柱的旋转、喷射、撞击,大量液体分子裂解而产生负离子,该带负电的粒子通过物理吸附、电性中和和化学反应等作用,能够处理酸性气体分子和异味分子等,从而达到辅助净化废气的作^[12-14]。

2.1 静态喷淋

在固定位置上,喷淋液柱表面吸收临近的酸性气体,使气体得到净化,则单个喷淋液柱的接触面积即为液柱的表面积。 M 个雾化喷嘴产生的静态喷淋面积即为

$$S_j = \pi d L M \quad (1)$$

式中: d 为喷淋液柱直径, mm; L 为喷淋液柱长度, mm。

2.2 动态喷淋

对于动态喷淋而言, 喷淋管围绕中轴线做旋转运动, 单位时间内雾化喷嘴变化了 n 个位置, 则每根喷淋水柱的接触面积均变化了 n 个位置。当旋转 N 周时, 动态喷淋接触面积为

$$S_d = \pi d L N M (\pi R / d) \quad (2)$$

式中: R 为喷淋管半径长度, mm。

则可求出动态接触面积和静态接触面积之比, 即

$$K = S_d / S_j = N (\pi R / d) \quad (3)$$

K 可近似看作高速旋转动态喷淋与不旋转静态喷淋时净化效率的比值。

由于净化效率和气、液接触面积成正比, 在实际运转时, 喷淋液柱的位置是连续变化的, 不同的位置有无数多个, 且高速旋转造成气液撞击, 使吸附更容易。所以, 高速旋转动态喷淋将产生更高效的净化效果。

3 叶轮的优化

动态喷淋结构完全依靠流体的动力驱动叶轮旋转, 从而带动自旋转喷淋管旋转^[15]。自旋转喷淋管的转速越快, 越有利于气液的充分接触和喷淋液柱的发散, 从而有利于提高酸性气体的净化效率。叶轮的结构将对喷淋管的转速产生重要的影响, 需要对其进行优化设计。

为此, 采用计算流体力学数值模拟的方法^[16], 研究了不同叶片数、不同倾斜角的叶轮对转速的影响, 以获得最优叶轮结构下的最大转速。

3.1 数值计算方法

计算流体力学中对物理模型的网格划分、计算方法的选择和边界条件的设定等, 均会对计算结果的准确性产生较大的影响, 故对数值计算方法进行详细介绍。

3.1.1 物理模型及网格划分

本研究采用等厚叶片的叶轮, 即叶片在径向方向的厚度保持不变。叶轮的倾斜角定义为叶轮螺旋线的切线与垂直轴线的夹角, 如图3所示。

在进行网格划分时, 对叶轮及其附近的复杂结构可以采用非结构网格划分方法, 然后对出口处进行部分加密处理, 有利于提高数值模拟的精度和计算效率。以6叶片的叶轮为例, 最后生成的网格数1 517 721个, 如图4所示。

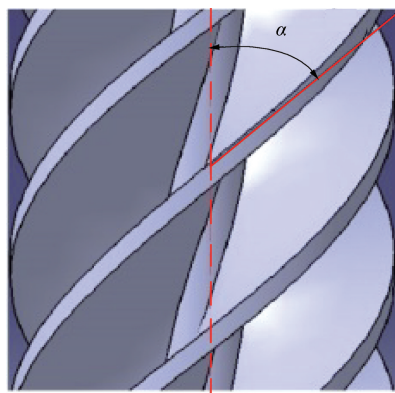


图3 叶轮倾斜角示意图

Fig.3 Schematic diagram of the inclination angle of impeller

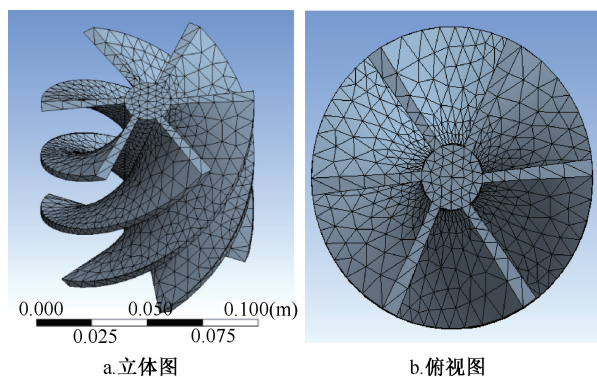


图4 叶轮网格图

Fig.4 Grid diagram of impeller

3.1.2 边界条件

在数值模拟计算时, 所有叶轮设置相同的初始条件和边界条件。

(1) 入口边界条件。入口边界设置为速度入口, 入口速度的大小根据涡流泵的排量计算。流体的速度垂直于叶轮的上顶面。

(2) 出口边界条件。出口定义为压力出口, 为一个标准大气压, 即出口压力为 101 325 Pa。流体通过叶轮后直接排入大气。

(3) 固体壁面边界条件。叶轮的整个流场为流体与叶轮壁面之间的相对运动, 壁面本身无移动, 满足无滑移条件, 定义为无滑移壁面, 近壁区采用壁面函数法处理。

3.1.3 模型求解

叶轮的旋转受到流体的驱动, 该流场中主要的驱动力为流体的动能, 旋转阻力主要为流体的黏滞力导致的动能耗散。考虑到湍动能和动能耗散率, 叶轮流场的湍流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 能对强旋流的仿真模拟提供较好的计算精度。

湍动能和耗散率的计算如下,即

(1) 湍动能方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t s_{ij} s_{ij} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

(2) 湍动能和耗散率方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & \rho c_1 \varepsilon \sqrt{2s_{ij} s_{ij}} - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\mu_t \varepsilon / \rho}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$c_1 = \max \left(0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right)$$

$$\eta = \sqrt{2s_{ij} s_{ij}} \frac{k}{\varepsilon}$$

$$C_2 = 1.9, C_{1e} = 1.44$$

式中: k 为湍动能, J ; ε 为湍动能耗散率; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ_t 为液体湍流黏度, $Pa \cdot s$; μ 为液体黏度, $Pa \cdot s$ 。

对于流场的计算,是基于有限元方法展开的,故控制方程选为离散的有限体积法,模拟的离散格式用二阶迎风格式,求解方式选用 Simple 计算方法^[17-18]。

3.2 结果分析

通过数值模拟结果,分析叶片数和倾斜角对转速的影响规律,从而优化叶轮的结构。

3.2.1 叶片数对转速的影响规律

叶片数取3、4、5、6、7、8,通过数值模拟获得不同叶片数条件下的转速结果,如图5所示。

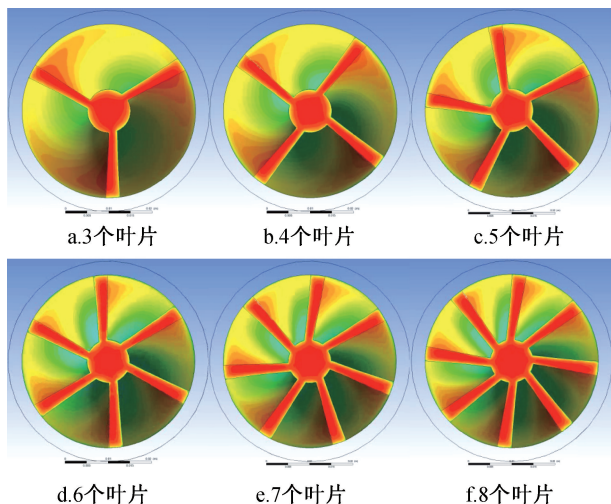


图5 不同叶片数数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results with different numbers of blades

图5中对应的转速值分别为3.5 r/min, 7.5 r/min, 10.0 r/min, 16.0 r/min, 12.5 r/min, 9.5 r/min。可以看出,随着叶片数的增加,叶轮的转速先增大后减小。这主要是因为,当叶片数较少时,流体流过叶轮后产生的驱动力较小,没有足够的力带动叶轮旋转。随着叶轮的叶片数增加,流体流过后产生的驱动力逐渐增加,使叶轮的转速逐渐加快。但是,当叶片数增大到一定程度后,继续增加叶片,使得流体的流动通道减小,即叶片占据了流体的流通通道,使得流体的流动阻力增加,流动速度降低,使叶片获得的驱动力减小,叶轮的转速随之减小。因此,优选叶片数为6个的叶轮,其对应的转速最大,更有利于对酸性气体的净化处理。

3.2.2 倾斜角对转速的影响规律

取10°、20°、30°、40°、50°、60°,通过数值模拟获得不同倾斜角条件下的转速结果,如图6所示。

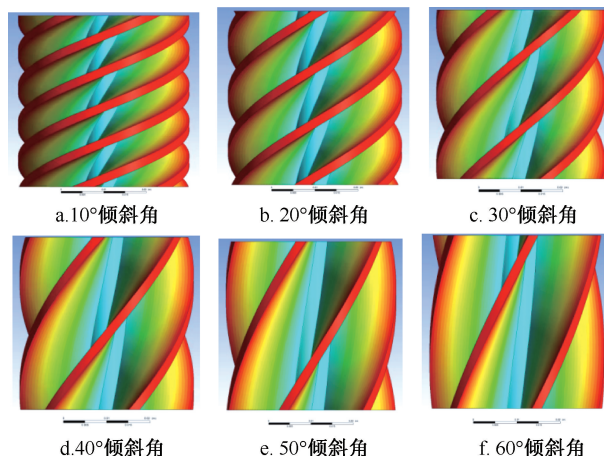


图6 不同倾斜角数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results with different inclination angles

图6中对应的转速值分别为4 r/min, 8 r/min, 12 r/min, 16 r/min, 10 r/min, 6 r/min。可以看出,随着叶轮倾斜角的增加,叶轮的转速呈现出先增大后减小的规律。这是因为,倾斜角较小时,流体对叶轮的冲击力小,即流体冲击叶轮后直接被输送过去,导致对叶轮的驱动力较小,极端情况是倾斜角度为0°时,流体直接流过叶轮,对叶轮没有冲击力。随着角度的增大,流体对叶轮的冲击力逐渐增大,转化为对叶轮的驱动力,使叶轮加速旋转。但是当倾斜角继续增大时,叶片扭转的幅度大,流体流过叶轮所经历的路程大,即沿程水力损失较大,并且由图6也可看出,随着倾斜角度的增大,叶片之间的间隙减小,使得流体在流动时受挤压,流动阻力较大,导致流动速度降低,对叶轮产生的驱动力较低。因此,优选倾斜角为40°的叶轮,其对应的转速最

大,更有利于对酸性气体的净化处理。

4 综合试验

通过室内综合试验测试该装置的净化效率,与静态喷淋的净化效率进行对比,并将测试结果与《石油化学工业污染物排放标准》的要求进行对比,以检验是否达标。

4.1 实验过程

以大港油田 X 井的实验为例。该井先期进行酸化改造储层,改善近井地带储层渗流能力。酸化施工共注入酸液 126 m³,酸化后放喷,返排液中夹杂挥发性酸性气体,带有刺激性气味。为了对比动态喷淋净化装置与静态喷淋的处理效果,将两种装置连接到气流管线中。具体实验流程为:

- (1)在井口返排液的回收管线上连接气液分离器,以分离酸性气体。
- (2)在主气管线上,利用三通分两条支路连接

动态喷淋净化装置和静态喷淋净化装置。两条支路所用管线的内径一致,以保证进入两个设备的酸性气体的气流量一致。

(3)分离出的酸性气体经主气管线,平均分配后,经两条支路管线分别进入两个设备。酸性气体自下而上飘散,碱液通过涡流泵向塔器内自上而下喷洒,从而中和吸收酸性气体。中和吸收过程中,涡流泵的供液压力均为 0.4 MPa。

(4)在支路管线上开有取样口,气体净化前进行取样。在两个设备的气体出口处设置取样口,气体净化后进行取样。

(5)检测处理前后酸性气体的组分含量,HF、HCl 气体采用离子色谱法检测。SO₂ 气体采用气相色谱方法检测。

4.2 实验结果分析

动态喷淋净化装置与静态喷淋的处理效果对比见表 1。

表 1 气体净化测试结果
Table 1 Gas purification test results

酸性气体	净化前浓度/ (mg·m ⁻³)	排放标准/ (mg·m ⁻³)	动态喷淋			静态喷淋		
			净化后浓度/ (mg·m ⁻³)	净化效率/ %	达标 情况	净化后浓度/ (mg·m ⁻³)	净化效率/ %	达标 情况
SO ₂	89.5	50.0	3.6	95.98	达标	61.5	31.28	未达标
HCl	162.3	30.0	7.5	95.38	达标	35.8	77.94	未达标
HF	10.8	5.0	0.4	96.30	达标	6.7	37.96	未达标

由表 1 可见,经过静态喷淋净化后,处理 3 种酸性气体均未能达到排放标准,整体的净化效率仅为 49.06%;而经过动态喷淋净化后,3 种酸性气体均能够达到排放标准,整体的净化效率为 95.88%,提高了 95.43%。由此可见,在不改变喷淋装置的整体尺寸的情况下,由静态转为动态喷淋,将大大提高对酸性气体的净化效率,实现小型、高效的目的,满足油气田作业现场对酸性气体的净化要求。

5 结论

- (1)设计了一种以叶轮为主要部件的自旋转动态喷淋结构和对应的动态喷淋净化装置,通过理论计算气液接触面积,说明了动态喷淋净化气体的高效性。
- (2)通过计算流体力学方法对动态喷淋的叶轮结构进行了优化设计,优选叶片数为 6 个,倾斜角为 40°的叶轮,可以提供 16 r/min 的转速。
- (3)动态喷淋净化装置处理后的酸性气体能够达到排放标准,具有广泛的适用性。

致谢:感谢渤海钻探井下技术服务公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 吴俊奇,吴文熙,颜懿柔,等. 压裂返排液处理现状及难点研究[J]. 水处理技术,2018,44(8):12-16.
WU Junqi, WU Wenxi, YAN Yirou, et al. Research on the treatment status and difficulties of fracturing flowback water [J]. Technology of Water Treatment, 2018,44(8): 12-16.

[2] 黄利平,孟向丽,杨森,等. 酸化返排液特征研究[J]. 石油化工应用,2018,37(1):61-64.
HUANG Liping, MENG Xiangli, YANG Miao, et al. Characteristics study of reacted flowback acid [J]. Petrochemical Industry Application, 2018,37(1):61-64.

[3] 王方祥,田娜娟,胡永雄,等. 压裂液返排期间放喷油嘴设计与工作寿命预测[J]. 油气井测试,2019,28(6):14-20.
WANG Fangxiang, TIAN Najuan, HU Yongxiong, et al. Design and life prediction of nozzle during fracturing fluid return [J]. Well Testing, 2019,28(6):14-20.

[4] 彭涛. 氨法烟气脱硫喷淋塔流场数值模拟与试验研究[J]. 安全与环境学报,2019,19(4):1399-1405.
PENG Tao. Numerical simulation and experimental testing

- through desulfurization tower of sintering flue gas ammonia process [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(4):1399-1405.
- [5] 王依谋. 气相旋流-液相射流方法用于含硫气体净化实验研究[D]. 上海:华东理工大学, 2018.
WANG Yimou. Experimented study of flue gas desulfurization by using gas cyclone-liquid jet method [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018.
- [6] LI S, ZHENG M, LIU W, et al. Estimation and characterization of unintentionally produced persistent organic pollutant emission from converter steelmaking processes [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(12):7361-7368.
- [7] 薛景岩, 陈阵, 丁艳军. 烟气湿法脱硫喷淋塔导流板优化[J]. 热力发电, 2019, 48(11):141-145.
XUE Jingyan, CHEN Zhen, DING Yanjun. Optimization of deflector in wet FGD scrubber [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11):141-145.
- [8] CHEN Zhen, WANG Haiming, ZHUO Jiankun, et al. Experimental and numerical study on effects of deflectors on flow field distribution and desulfurization efficiency in spray towers [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 162(3):1-12.
- [9] LIU D, CHEN B, ZHANG B. Numerical simulation of the two-phase fluid field in a gas-around-liquid spray nozzle [J]. Chemical Engineering & Technology, 2013, 36(3):450-458.
- [10] 王筱蓉, 金张良, 任贵龙, 等. 喷淋方向对船舶 I 型脱硫塔内部流场的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(1):104-111.
WANG Xiaorong, JIN Zhangliang, REN Guilong, et al. Effect of spray direction on flow field in I-type ship desulfurization tower [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(1):104-111.
- [11] 钱付平, 黄小萍, 曹博文, 等. 转炉一次除尘新 OG 系统高效喷淋塔喷嘴布置方式对喷淋特性的影响[J]. 过程工程学报, 2019, 19(3):500-509.
QIAN Fuping, HUANG Xiaoping, CAO Bowen, et al. Effect of nozzle layout in high efficient spray tower of new OG system of primary dedusting system for converter on spray characteristics [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(3):500-509.
- [12] 袁晓明, 王储, 朱轩, 等. 气液混合流体动态体积弹性模量理论模型研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4):209-217.
YUAN Xiaoming, WANG Chu, ZHAO Shiyi, et al. Investigation on bulk elastic modulus of air and liquid mixing fluid [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(4):209-217.
- [13] MOUMITA S, NILUTPAL G, AVIJIT B. Thermal performance of a cross-flow rotating spray bed [J]. Materials Science and Engineering, 2020, 894(1):1-6.
- [14] 黄蓉, 胡海, 伍培, 等. 利用空气负离子净化新风实验研究[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(6):65-67.
HUANG Rong, HU Hai, WU Pei, et al. Experimental research of fresh air purification with air negative ion [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(6):65-67.
- [15] 程鸿亮, 伊卫林, 季路成. 机器学习在高压比离心叶轮优化设计中的应用研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(11):2734-2741.
CHENG Hongliang, YI Weilin, JI Lucheng. Application research of machine learning in optimal design of high pressure-ratio centrifugal impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(11):2734-2741.
- [16] ORTOLANI A, PERSICO G, DROFELNIK J, et al. Computational fluid dynamics analysis of floating offshore wind turbines in severe pitching conditions [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2020, 142(12):241-249.
- [17] 杜飞龙, 黄海松, 唐世灏, 等. 双叶轮作用下流体速度场特性有限元分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(7):1-4.
DU Feilong, HUANG Haisong, TANG Shihao, et al. Finite element analysis of fluid velocity field characteristics under the action of double impellers [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(7):1-4.
- [18] 费建国, 罗会信, 左兵权, 等. 雷诺方程的数值计算方法概述[J]. 润滑与密封, 2020, 45(4):130-140.
FEI Jianguo, LUO Huixin, ZUO Bingquan, et al. An overview of numerical methods for reynolds equation [J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(4):130-140.

编辑 刘振庆

第一作者简介:王方祥,男,1987年出生,博士,工程师,2017年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位,现从事石油井下相关工具设备的设计与技术研究工作。电话:022-25934595,15822162989;Email:wangfangxiangcnpc@126.com。通信地址:天津市滨海新区港西大道640渤海钻探工程公司井下技术服务公司测试工程作业部,邮政编码:300280。