

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.01.002

乳化炸药全静态乳化器流场数值模拟分析*

迟洪鹏^① 龚兵^② 臧怀壮^① 黄麟^①

①北京北矿亿博科技有限责任公司(北京,100160)

②北京矿冶研究总院(北京,100160)

[摘要] 分析了国内外乳化炸药乳化器的发展现状及趋势。设计了乳化炸药全静态乳化器。对全静态乳化器的流场数值进行了模拟分析,对水相射入速度为10、15、20 m/s和25 m/s时内部流场情况进行了仿真对比和生产试验。结果表明:采用水相对射的方式,有利于油水相的混合;随着水相射入速度的提高,湍动能强度逐渐增大,油相分散得也更加均匀,有利于乳化。

[关键词] 乳化炸药;全静态乳化器;湍动能

[分类号] TQ560.5;TD235.2⁺¹

Numerical Simulation of Flow Field in Full Static Emulsifier Applied to Produce Emulsion Explosive

CHI Hongpeng^①, GONG Bing^②, ZANG Huaizhuang^①, HUANG Lin^①

①BGRIMM Explosives Blasting Technology Co., Ltd. (Beijing, 100160)

②Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy (Beijing, 100160)

[ABSTRACT] Development and trend of emulsion explosive emulsifier at home and abroad were analyzed. A full static emulsifier for emulsion explosive was designed. Flow fields in this full static emulsifier at various injection velocity of water phase of 10m/s, 15 m/s, 20 m/s and 25 m/s were numerically simulated and compared. The production experiments were also carried out. Results show that the relative firing of water facilitates the mixing of oil and water phases. As the injection rate of water phase increases, the intensity of turbulent kinetic energy increases gradually, and the oil phase is dispersed more evenly, which is beneficial to emulsification.

[KEYWORDS] emulsion explosive; full static emulsifier; turbulent kinetic

引言

目前,国内乳化炸药生产线的乳化器大多为高速剪切型动态乳化器。其主要缺点是:乳化器内部定子和转子的间隙小,水、油相溶液在定子和转子的强烈剪切和撞击作用下(转速1 400~3 000 r/min),形成油包水型结构的乳化基质,同时吸收机械能升温,安全性差;尤其是出现动齿松动、变形、断裂或转子主轴窜位等异常时,定齿与动齿摩擦极易产生火花并引发安全事故,本质安全性差^[1]。

近年来,国内民爆技术研发企业先后引进或自主开发了“动态初乳+静态精乳”的静态乳化技术,

在一定程度上提高了生产过程的安全性^[2]。但是,动态初乳器依然是机械回转式结构,只是增大了搅拌器与设备内壁的间隙,其乳化罐空积达到100 L以上,在一定程度上增加了在线药量,本质安全性还有待进一步的提高^[2]。

国内的乳化设备发展经历了桨叶式乳化罐、胶体磨、高速剪切型动态乳化器及近年来开始研究的静态乳化技术等阶段。

简单桨叶式乳化罐常见于20世纪80~90年代的间断式生产线中;而初乳与胶体磨配套的乳化技术由于胶体磨转速高达3 000 r/min,且动静盘之间间隙很小(约0.5 mm),存在很大的安全隐患;因此,这几种乳化技术已逐步淡出历史舞台。

* 收稿日期:2017-08-04

作者简介:迟洪鹏(1983-),男,博士,高级工程师,主要从事矿山机械、工业炸药现场混装技术与装备的研究。E-mail:hongpengchi@163.com

通信作者:龚兵(1974-),男,硕士,教授级高工,主要从事工业炸药现场混装技术与装备的研究。E-mail:gongbing@bgrimm.com

目前,国内在乳化炸药连续化生产线上以应用高速剪切型动态乳化技术为主,主要有上海市化工装备研究所的 SRF 型乳化器、煤炭科学总院爆破技术研究所的 DRJ 系列乳化器、石家庄成功机电有限公司 CKR 和 CYJ 系列乳化器、湖南金能科技股份有限公司 AE-HLC 型乳化器、北京矿冶研究总院 JRJ 系列乳化器等。其工作原理是不同形状的定子与转子在 1 500 ~ 3 000 r/min 的高速旋转下相对运动,物料通过定子与转子的环状间隙时受到强烈的机械剪切、撞击摩擦等作用,得到分散、乳化。北京矿冶研究总院曾分别就上海化工研究院研制的 5 种静态混合器进行过对比试验。结果表明,SV 型静态混合器在油水乳化性能方面优于其他类型的静态混合器。在此基础上,自主开发了“动态初乳 + 静态乳化”生产工艺,研制成功了敞口、低转速(低于 600 r/min)初乳器和没有机械式可动部件的静态混合器,生产安全性得到了提高。

国外在乳化炸药(乳化基质)生产的高效、安全及连续乳化自动控制等方面处于领先地位,在连续乳化技术中,可分为动态乳化技术、动态 + 静态乳化技术及全静态乳化技术。

早期美国、澳大利亚等国家都已对高速机械剪切型动态乳化技术进行了研究。

动态 + 静态乳化技术是目前广泛采用的一种技术方案。发达国家也较早对此技术进行了相关研究。美国在 2000 年的专利中披露了乳化炸药制造工艺及设备,其中乳化设备采用研磨机、静态混合器、液体射流发生器或其组合^[3]。

关于完全无剪切全静态连续乳化技术,美国专利中提出采用喷嘴静态混合器,利用突然失压、高速撞击及紊流换能的方式进行乳化,其产量可以达到 1.2 ~ 12.0 t/h。美国 Power 提出了一种管道静态混合器,外相喷嘴置于内相流轴线上,管道中前部为变形文丘里管,中后部为多个开口槽板,径向槽有一定角度取向。另外,欧美专利中都提出采用高产均化管(管道式)乳化,在管道一端为水相喷嘴,侧面设置油相出口,采用突然失压和高速碰撞的双重作用,产量可以达到 15 t/h^[4-5]。

紧跟国际工业炸药技术前沿,开发设备内部无机械回转装置的全静态乳化技术,符合我国民爆行业技术发展方向,有利于提高乳化炸药生产的本质安全性。采用流体力学仿真软件对乳化炸药全静态乳化器流场进行数值模拟,可对全静态乳化器内部水油相的混合情况进行有效分析,有利于全静态乳化器结构的优化设计。

1 全静态乳化器结构设计

全静态乳化器借助流体管路的不同结构,得以在很宽的雷诺数范围内利用流体的切割、剪切、旋转等作用,使互不相溶的流体形成纳米级乳胶微粒。试验研究表明,不同的油水乳化装置制备的乳化基质的稳定性有很大的差异,结构不合理的油水乳化装置所配乳胶基质中的乳化油滴较大,静置时易层化析油^[6]。

全静态乳化过程是一种复杂的流固耦合动力学过程。本乳化器在查阅国内外资料后,采用了水相高速射入油相,利用富油逐级乳化形成油包水的乳胶微粒的基本技术路线,对静态乳化器进行了设计。本设计中,考虑油相比比例只有 6.5%(质量分数)左右,流量小,形成的湍动能较小;因此重点利用水相射流的湍动能,根据富油原则,油相一次加入,水相逐级喷射加入,结构见图 1。

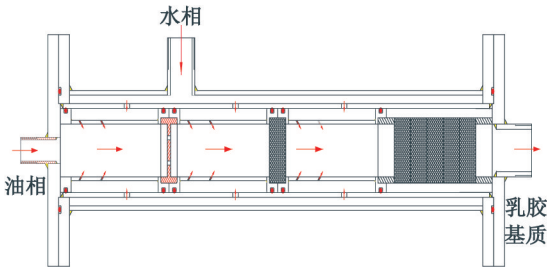


图 1 全静态乳化器结构
Fig. 1 Structure of the full static emulsifier

乳化炸药全静态乳化器主要由外套筒、内套筒、内芯混合模块 3 个部分组成。其中,一个内芯混合模块包括一个内芯混合腔室和一个内芯混合单元或多个内芯混合单元(见图 1)。

内芯采用模块化设计,可以相互替换,数量自由配置,其中,内芯混合单元主要采用 SV 结构的混合器。根据不同的生产工艺及产量,乳化器长度及直径可以进行具体参数设计。

如图 1 所示,外套筒两端通过法兰封装,拆开法兰,内芯混合模块便可方便取出。内芯混合模块把内套筒分为 3 个腔室,针对每个内腔室,内套筒上下各设有 1 个大的水相流入孔,在每个内芯混合腔室壁的上、下分别设有 2 个水相喷射孔。

水相喷水孔与水平方向成 45°角,上部和下部的的水相喷射孔采用对射的方式,使得水相在腔室内中心处对射对撞,分散为小液滴,然后与油相在腔室内形成紊流、碰撞、混合对撞,从而使混合充分。

2 全静态乳化器流场数值模拟分析

2.1 模型的建立

采用 SolidWorks 建立第一个腔室模型,具体尺寸参考实际的物理模型。模型结构如图 2 所示。



图 2 物理模型
Fig. 2 Physical model

运用 Icem 软件对模型进行流体流动域的简化和网格的划分,网格总数为 781 735,总体网格质量大于 0.4,网格划分如图 3 所示^[7]。

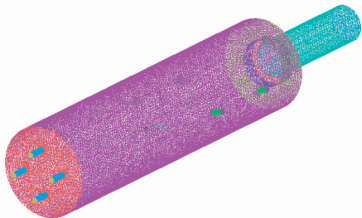


图 3 网格划分模型
Fig. 3 Mesh model

2.2 结果分析

利用 ANSYS CFD 流体动力学分析软件对全静态乳化器内部流场进行分析。参考实际的工艺参数,具体边界条件设置如下:水相的入口采用速度入口,具体的速度 v_0 为 10、15、20 m/s 和 25 m/s;油相的入口采用质量入口,流量为 3.4 kg/min;流体出口采用压力出口。

从图 4 中可以看出,基本流场形式相似。4 个水相入口两两相对,两股流体以较大的速度从入口流入,相互碰撞,有利于油水的混合^[8-9]。其次,从入口流入的水相初速度较大,但是随着流动路程的延长,速度逐渐减小。比较发现,在两股流动的碰撞区,初速度为 25 m/s 的水相衰减幅度最大,但是仍有 7 m/s 的流速;而初速度为 10 m/s 的水相衰减幅度最小,但是速度也是最小的,只有 2.5 m/s。

为了更好地预测流场对油水两相的混合程度,通过比较不同结果下的湍动能强度来比较不同流场的搅拌强度^[10-11]。从图 5 中可以看出,随着水相入口速度的逐渐提高,湍动能强度也逐渐增大,有利于搅拌混合的流场趋势也逐渐增大。

从图 6、图 7 中可以看出,油相从入口流入后,都有分散得更加均匀的趋势。而且随着水相给料流速的提高,油相分散得也更加均匀。通过比较发现,当水相的给料流速较低时,油相虽然也有分散更加均匀的趋势,但是仍有局部区域的集中,这应该是搅拌强度略低造成的^[12]。

为了更好地评价油相的分散均匀度,取内部腔室临近出口截面的油相体积浓度进行量化分析。如图 8(b),黄色部分为截取内部物料的一个截面,均匀取截面上 3 408 个点的油相体积浓度,取其方

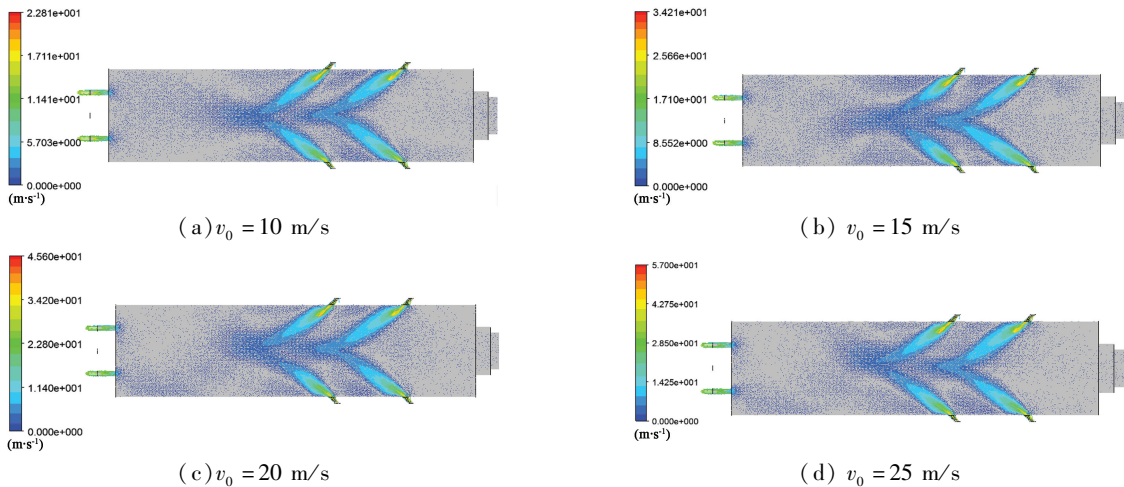


图 4 入口截面的速度矢量图

Fig. 4 Velocity vector diagram at inlet cross section

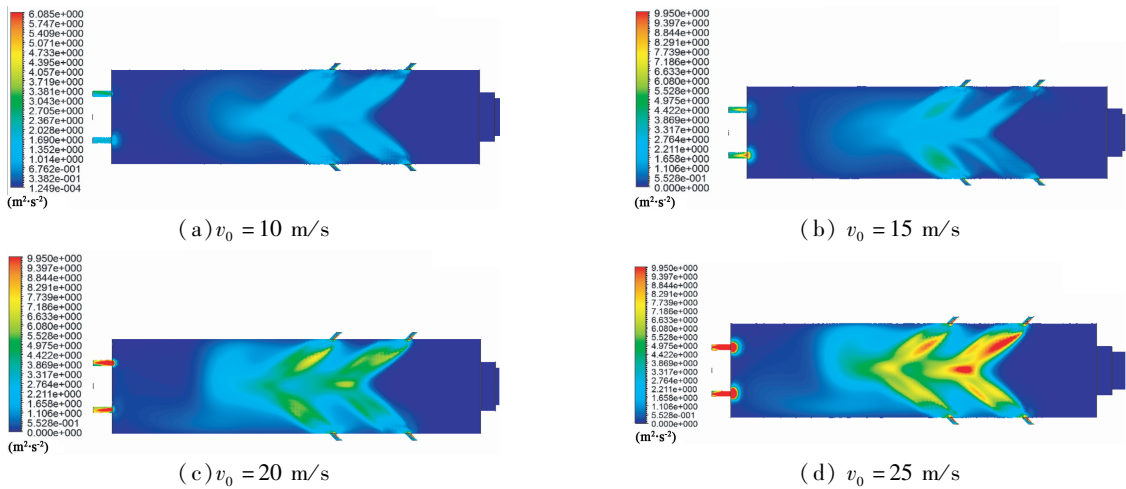


图 5 湍动能云图
Fig. 5 Nephogram of turbulent kineticenergy

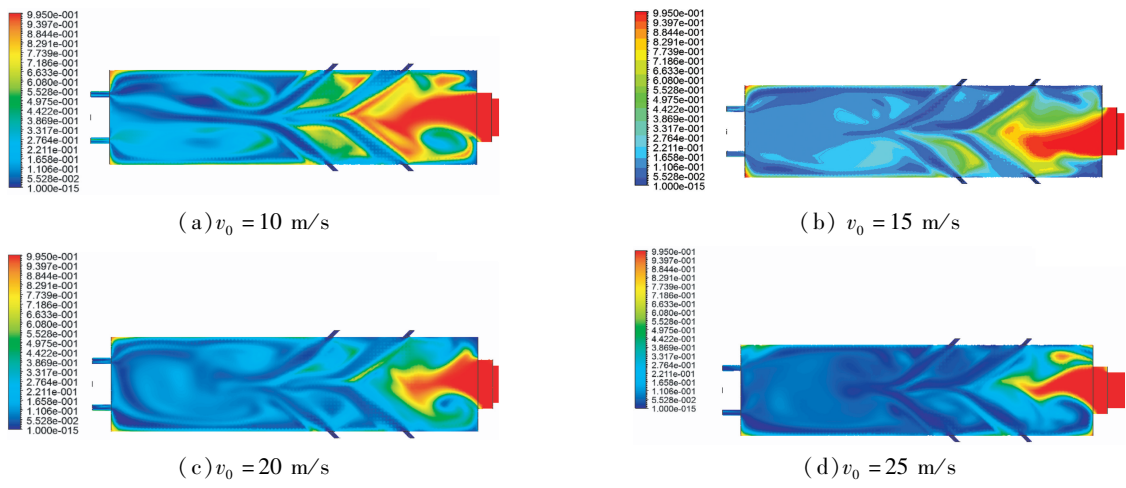


图 6 油相入口截面的体积浓度分布云图
Fig. 6 Volume concentration distribution nephogram of the oil phase at inlet cross section

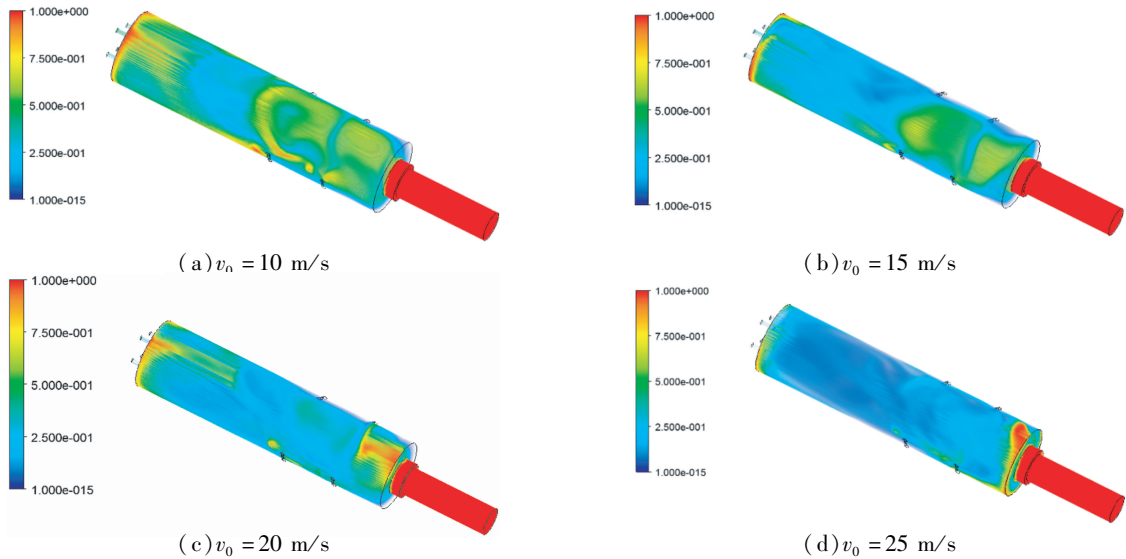


图 7 全局体积浓度分布云图
Fig. 7 Distribution nephogram of global volume concentration

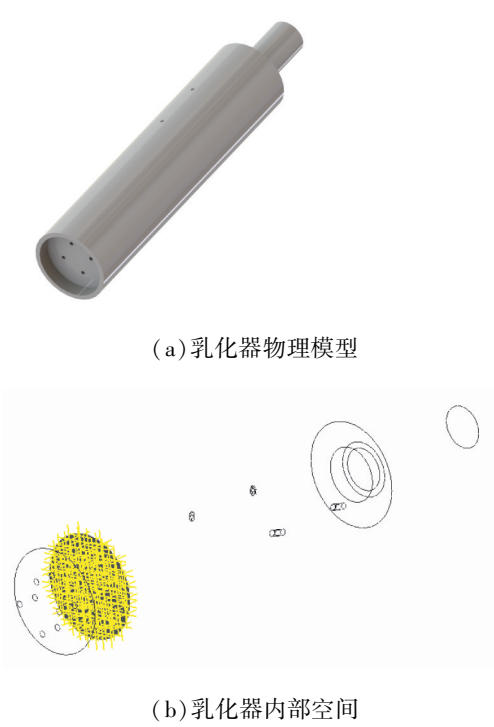


图 8 取样示意图
Fig.8 Sampling sketch map

差来评价油相的分散均匀性^[13-14]。

表 1 为水相射流速度分别在 10、15、20 m/s 和 25 m/s 时,所取截面油相体积浓度的方差。从表 1 中油相体积浓度方差数据可以看出,随着水相射流速度的提高,方差的值也逐渐变小,说明油相的分散趋近于更加均匀^[15];在水相射流速度从 10 m/s 到 20 m/s 过程中,油相体积浓度方差变化不明显,对油、水相的均匀混合影响不明显。这对考虑降低射流速度、减小射流压力降、降低设计系统压力有重要的指导意义。

表 1 方差对比
Tab.1 Variance contrast

水相射流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	方差
10	0.156 787 776
15	0.133 395 734
20	0.125 261 144
25	0.056 803 044

3 生产试验

为了验证全静态乳化器内部流场数值模拟的可靠性,对全静态乳化器进行了乳化基质的生产试验(图 9)。

通过分析乳化基质制备的试验数据(表 2),可



图 9 生产试验现场
Fig.9 Production test

表 2 乳化基质制备试验数据

Tab.2 Experimental data of emulsion matrix preparation

序号	水相射流速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水相入口 压力/MPa	乳化状态
1 [#]	10	0.32	乳化效果不好, 有时不成乳
2 [#]	15	0.57	乳化效果一般
3 [#]	20	0.98	乳化效果良好
4 [#]	25	1.32	乳化效果良好

知系统压力符合设计计算的要求,压力均在预期的范围内。通过生产试验发现,随着水相射流速度的增加,乳化基质的乳化效果也逐渐变好。当水相射流速度达到 20 m/s 以上时,乳化效果良好。这也符合流程数值模拟分析的结果。

4 结论

- 1)采用水相对射的方式,油、水相在混合器内相互碰撞,形成紊流,有利于油、水相的混合。
- 2)随着水相射入速度的提高,湍动能强度也逐渐增大,有利于搅拌混合的流场趋势也逐渐增大,油相分散得更加均匀。
- 3)通过比较发现,当水相的给料流速降低,射入速度为 10 m/s 时,油相虽然也有分散得更加均匀的趋势,但是仍有局部区域的集中,是搅拌强度略低造成的。
- 4)利用流场数值模拟,可以比较清楚地分析油水相在混合器内的流场状态,有利于乳化炸药全静

态乳化器的结构设计,优化结构参数。

参 考 文 献

- [1] SHABANI M O, MAZAHERY A, ALIZADEH M, et al. Computational fluid dynamics (CFD) simulation of effect of baffles on separation in mixer settler[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22: 703-706.
- [2] GHANEM A, LEMENAND T, DELLA VALLEA D, et al. Static mixers: mechanisms, applications, and characterization methods-A review [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(2): 205-228.
- [3] 张静, 仇培强. 静态乳化器[J]. 工程爆破, 2016, 22(3): 31-33, 39.
ZHANG J, ZHANG P Q. Static emulsifier[J]. Engineering Blasting, 2016, 22(3): 31-33, 39.
- [4] 张国锋, 张琴, 张慢来, 等. 基于流场模拟的新型静态混合器结构优化[J]. 石油机械, 2015, 43(11): 92-95.
ZHANG G F, ZHANG Q, ZHANG M L, et al. Optimization of a new static mixer based on CFD simulation[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(11): 92-95.
- [5] 熊志杨, 吴晓琴, 王海强. SK型静态混合器中气液两相流场的模拟研究[J]. 工业安全与环保, 2013, 39(6): 79-81.
XIONG Z Y, WU X Q, WANG H Q. Numerical simulation of gas-liquid flow in SK static mixer[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2013, 39(6): 79-81.
- [6] 王泽斌, 宋涛, 张春梅. SV型静态混合器数值模拟湍流模型选择[J]. 当代化工, 2016, 45(1): 166-168, 188.
WANG Z B, SONG T, ZHANG C M. The turbulence model choice of SV static mixer[J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(1): 166-168, 188.
- [7] 王旭, 赵春立, 韩万里, 等. 稠油掺稀井下静态混合器数值仿真研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2015, 17(4): 50-53, 84.
WANG X, ZHAO C L, HAN W L, et al. Numerical simulation of the down hole static mixer for heavy oil thin mixing[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 17(4): 50-53, 84.
- [8] 王宗勇, 陈超. 多流道螺旋静态混合器混合性能的数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 268-273, 279.
WANG Z Y, CHEN C. Numerical simulation of mixing performance in a multi-channel spiral static mixer[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 268-273, 279.
- [9] 陆芳琴, 刘令云, 刘文礼. 射流乳化后浮选药剂破乳情况研究[J]. 选煤技术, 2012(1): 5-7.
LU F Q, LIU L Y, LIU W L. Research on breaking condition of flotation reagent emulsified by jet technology[J]. Coal Preparation Technology, 2012(1): 5-7.
- [10] LOBRY E, THERON F, GOURDON C, et al. Turbulent liquid-liquid dispersion in SMV static mixer at high dispersed phase concentration[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(23): 5762-5774.
- [11] DE B, MANDAL T K, DAS G. Experimental studies on phase inversion in a small diameter horizontal pipe[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2010, 88(7): 819-826.
- [12] ANGELI P, HEWITT G F. Flow structure in horizontal oil-water flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(7): 1117-1140.
- [13] ZHAI L S, ANGELI P, JIN N D, et al. The nonlinear analysis of horizontal oil-water two-phase flow in a small diameter pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 92: 39-49.
- [14] ZHAI L S, JIN N D, ZONG Y B, et al. Experimental flow pattern map, slippage and time-frequency representation of oil-water two-phase flow in horizontal small diameter pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 76: 168-186.
- [15] WANG W, LIU J, WANG P Y, et al. Evolution of dispersed drops during the mixing of mineral oil and water phases in a stirring tank[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 91(2): 173-179.