

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.04.013

改性双基推进剂制备中硝化甘油的连续加料与计量技术*

何那仁朝格图 邓国栋 鲁磊明 王路路 王志强

南京理工大学国家特种超细粉体工程技术研究中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了实现改性双基推进剂制备过程中硝化甘油的安全输送和精确计量,利用乳化喷射器、直管质量流量计及数据处理器(PLC)对硝化甘油(NG)与水的混合液进行了连续加料与计量试验研究。利用 Fluent 模拟软件对 NG 的乳化喷液过程进行模拟分析,得到最佳的乳化喷射器结构参数为:喉管直径 14.33 mm,喉管长度 60.03 mm,喉嘴距 12.00 mm;在此结构参数下进行模拟分析得到:乳化喷射器出口处 NG 最大体积分数小于 30%,且所占节点比率小于 0.05,说明 NG 与水混合均匀,确保了 NG 安全连续输送。研究了质量流量计在不同管道压力下对计量精度的影响,当管道压力为 0.25~0.31 MPa 时,能满足质量流量计的检测要求,计量误差 $\leq 1.0\%$,能满足改性双基推进剂连续制备的工艺要求。

[关键词] 硝化甘油;乳化喷射器;乳化混合;质量流量;计量

[分类号] TQ560.7

Continuous Feeding and Measurement of Nitroglycerin in Preparation Process of Modified Double-base Propellant

HE Narenchaogetu, DENG Guodong, LU Leiming, WANG Lulu, WANG Zhiqiang

National Special Superfine Powder Engineering Center, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to achieve the safe delivery and accurate measurement of nitroglycerin (NG) in the process of manufacturing modified double base propellant, three core innovations, emulsion ejector, straight tube mass flowmeter and PLC data processor, have been studied. The continuous addition and metering test on mixture of NG and water were carried out. Emulsification and spraying process of NG was simulated and analyzed by simulation software, FLUENT, from which the best structural parameters of the emulsifier were obtained: throat diameter is 14.33 mm, throat length is 60.03 mm, and distance between throat is 12.00 mm. Simulation analysis was performed under these structural parameters, and results show that the maximum volume fraction of NG at the exit of the emulsifying injector is less than 0.3 and the node ratio is less than 0.05, indicating that NG and water was mixed well to ensure the safety of continuous transmission of NG. Emulsifying injector, straight tube mass flow meter and PLC data processor were also applied in continuous addition and metering test of NG/water mixtures. Effects of mass flowmeter on the measurement accuracy under different pipelines pressures were identified. Pipeline pressure between 0.25 MPa and 0.31 MPa meets the requirements of mass flowmeter testing, and measurement error is no more than 1.0%, which meets the technical requirements of continuous preparation of modified double base propellant.

[KEYWORDS] nitroglycerin (NG); emulsifying injector; mixed emulsion; mass flow; measurement

引言

硝化甘油(NG)是改性双基推进剂的主要成分

之一,作为液体火药组分,其含量的大小对火药的能
量和其他的性能都有较大的影响^[1]。由于 NG 的感
度很高,极易发生爆炸,长期以来,我国的火药工业
生产缺少连续加料计量的方法,在生产过程中采用

* 收稿日期:2017-03-16

基金项目:国防火炸药科研专项项目(AS03141)

作者简介:何那仁朝格图(1993-),男,硕士研究生,从事材料工艺技术研究。E-mail:810036905@qq.com

通信作者:邓国栋(1965-),男,高级工程师,从事含能材料工艺技术研究。E-mail:13505196092@163.com

的是人工称量、人工加料,然后利用高压水进行输送的方法^[2]。该方法由于缺乏连续的加料和精确计量手段,导致生产效率低下、生产过程不连续、计量精度差,并且对设备和人员存在极大的安全隐患。与我国现阶段提出的实现含能材料生产过程的自动化、连续化要求不符。

为此,要实现对 NG 计量加料工艺的改进,需要实现加料过程的连续和加料量的准确计量。由于 NG 的特殊性,存在的主要问题有两点:首先,输送过程要使 NG 与水形成乳浊液,保证输送安全;但是由于乳化不均匀,乳化液中油相不稳定,易产生分层,造成安全隐患的同时,也使计量不准确。其次,传统的 NG 计量方法是通过人工称量投料,再利用高压水输送加入到吸收槽中,计量方法落后,无法实时查看瞬时流量和累计流量,无法对双基火药制备过程的加料量进行实时的控制。除以上两点之外,NG 的感度高、易爆,给输送和计量过程带来极大的安全隐患,对设备的性能也有更高的安全要求^[3]。

为解决上述问题,实现对 NG 的安全输送与精确计量,本试验中,利用乳化喷射器、直管质量流量计及数据处理器(PLC)对 NG 进行连续加料与计量试验。为降低加料过程中 NG 的感度,采用与水乳化混合的输送方法,利用乳化喷射器,确保 NG 与水输送时充分乳化,能够保证在 50 m 内 NG 不与水分层,以保障 NG 输送过程的安全和计量过程的准确^[4-5]。在计量过程中,在线检测 NG 乳化液的瞬时质量流量和累积质量流量,通过 PLC 进行处理,得到 NG 的瞬时质量流量和一段时间内累积质量流量(即加料量)。建立了 NG 在线连续计量系统,实现对 NG 的安全输送与精确计量。

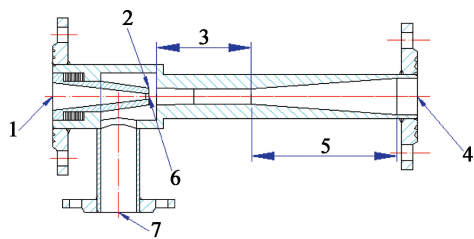
1 硝化甘油安全、连续加料方法

由于 NG 的感度很高,将其与水进行乳化混合,可保证其在输送计量过程中的安全性。NG 和水进行的混合属于液-液混合,液-液混合是通过一定的混合手段,将两种及两种以上不同的液体相互掺混,并最终形成均匀混合液体的过程^[6]。因此,需设计加工一台乳化喷射器,用于 NG 和水乳化输送,以确保 NG 安全、连续输送,并为精确计量创造条件。

1.1 乳化喷射器结构及工作原理

乳化喷射器主要结构包括喷嘴、混合室、喉管和扩散段^[7],其二维结构如图 1 所示。

乳化喷射器工作时,高压水由入口进入,通过喷嘴以一定速度射出,此时高压水的静压能转换为动



1 - 高压水入口;2 - 混合室;3 - 喉管;4 - 出口;
5 - 扩散管;6 - 喷嘴;7 - NG 入口。

图 1 乳化喷射器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of emulsifying injector

能,由于静压的降低,混合室内形成一定负压,在负压的作用下,NG 在入口处被吸入混合室内与高压水相遇,并被带入到喉管中,在混合室与喉管内,高压水与 NG 之间伴随着能量交换发生混合;随着混合的进行,高压水的速度逐渐减小,NG 的速度逐渐增大,乳化喷射器内部的压力逐渐增大,最终 NG 与水形成混合液,从乳化喷射器出口流出^[8]。由于乳化喷射器本身密封性好,在整个喷射混合的过程中无运动部件,不存在机械的作用,高压水压力在 0.10 ~ 0.30 MPa 时,可实现 NG 与水的安全、均匀混合,能够保证乳化混合效果,为后续对乳化液的精确计量提供了较好的计量条件。

1.2 乳化喷射器乳化混合效果

保证 NG 在水中分散且形成的乳化混合液稳定、不分层是实现 NG 安全输送计量的前提,这就对所用乳化喷射器的乳化混合效果提出了一定的要求。影响乳化喷射器乳化混合效果的主要结构因素有面积比(喉管进口面积与喷嘴出口面积之比)、喉管长度、喉嘴距(喷嘴出口与喉管入口间的距离)、扩散管角度等。要使 NG 与水达到较好的混合状态,就需对乳化喷射器的结构进行优化^[9]。本试验中,所使用的乳化喷射器的结构尺寸是通过流体力学软件 Fluent 进行仿真分析,利用单因素分析法而得到的最优结构参数,对应的结构尺寸分别为:喷嘴直径 6.0 mm、喉管直径 14.33 mm、喉管长度 60.03 mm、喉嘴距 12.00 mm、扩散管角度 6°。

为验证模拟软件的可信度以及在该结构尺寸下乳化喷射器对 NG 与水乳化喷射混合的效果,采用软件 Fluent 对整个乳化混合的过程进行仿真模拟。设定入口处压力值(p_1)分别为 0.10、0.15、0.20、0.25 MPa 和 0.30 MPa,分别得出乳化喷液器出口压力的模拟值(p_2),二者相减得出乳化喷液器压降的模拟值(Δp)。设计检验试验,如图 2 所示工艺流程,将水槽装满水,储料桶加入适量 NG,关闭阀门

2,打开水泵,待水流稳定后,打开阀门2,使 NG 被吸入乳化喷射器中,然后调整阀门1,使压力表1的数值分别稳定在相应压力值(即入口处压力值 p_1),记录压力表2的数值(即出口处压力试验值 p_3),与入口压力相减,得出乳化喷射器压降的试验值 $\Delta p'$,结果见表1、图3。

表1为试验乳化混合过程与模拟乳化混合过程

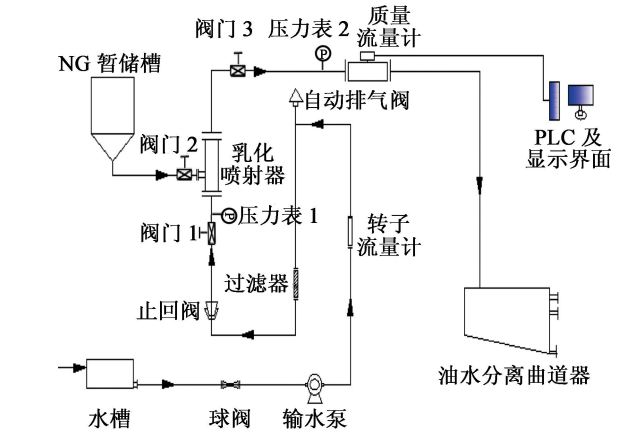


图2 NG 在线精确计量工艺流程

Fig. 2 Process flowchart of online accurate measurement of NG

表 1 试验压降与模拟压降比较

Tab. 1 Comparison of experiment pressure drop and simulated pressure drop

MPa				
p_1	p_2	p_3	Δp ($= p_1 - p_2$)	$\Delta p'$ ($= p_1 - p_3$)
0.100 0	0.087 5	0.088 0	0.012 5	0.012 0
0.150 0	0.134 9	0.136 0	0.015 1	0.014 0
0.200 0	0.182 8	0.184 0	0.017 2	0.016 0
0.250 0	0.228 7	0.230 0	0.021 3	0.020 0
0.300 0	0.277 5	0.276 0	0.022 5	0.024 0

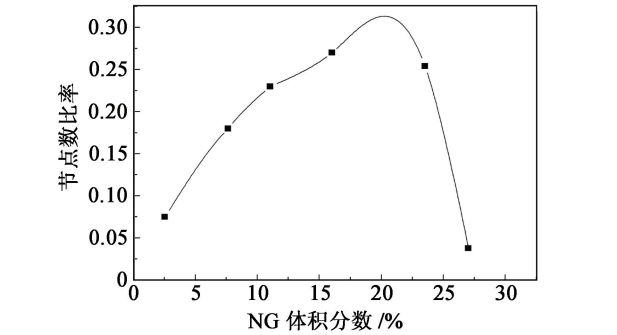


图3 乳化喷射器出口截面 NG 的体积分布
Fig. 3 Volume distribution of NG at outlet of emulsifying injector

中乳化喷射器进出口的压降值对比。图3为模拟乳化混合过程中乳化喷射器出口截面处 NG 的体积分布。图3中,纵坐标节点数比率反映的是在乳化喷射器出口截面上某一 NG 体积分数的所有节点数占该截面总节点个数的比率。

由表1可以看出,实际试验时,乳化喷射器进、出口的压降值与软件 Fluent 模拟时的压降值接近,说明乳化喷射器将 NG 与水乳化混合过程的模拟与实际情况接近,模拟的结果能真实地反映乳化混合情况。文献[10]认为,当混合液中 NG 的体积分数小于33%时,NG 不起爆;当混合液中 NG 的体积分数小于25%时,既不起爆也不传爆。由图3可知,在最优的乳化喷射器结构尺寸下,NG 和水经乳化喷射器乳化混合后,在乳化喷射器的出口截面处,混合液中 NG 的最大体积分数小于30%,且所占的比率较小,说明 NG 在混合液中比较分散,乳化喷射器乳化效果较好。由此可知,该结构尺寸的乳化喷射器能较好地实现 NG 与水的乳化混合,可满足 NG 安全输送计量的要求。

2 NG 在线连续计量方法

2.1 计量设备

开展 NG 的在线连续计量的研究,主要是为了实现在火药生产过程中对 NG 的瞬时质量流量及累计质量流量的在线连续精确计量。NG 与水为液-液混合,可选用的计量仪器较多,但考虑到 NG 的易爆性,为防止物料滞留带来的安全隐患,在计量过程中摒弃存在机械搅动或有弯管的流量计,而选用直管质量流量计对其进行计量,以保障计量过程的安全、连续^[11]。直管质量流量计如图4所示。



图4 直管质量流量计实物
Fig. 4 Straight mass flowmeter

2.2 NG 在线连续计量装置

NG 在线连续计量工艺流程如图2所示,高压水从水槽中经过球阀进入高压水输送管道,输水泵为其提供动力,可以根据需要调节工作水的流量大小。工作水经过转子流量计与过滤器,进入乳化喷

射器中。为防止工作水中含有气体而导致安全隐患,在管道中添加了自动排气阀,实现工作水中无气泡。高压水经乳化喷射器中形成负压,将 NG 吸入乳化喷射器中,实现 NG 与水的乳化混合输送。在乳化喷射器的入口处,安装有止回阀,防止 NG 倒吸进入高压水系统。形成的稳定的乳化液,经过直管质量流量计,最终流入油水分离曲道器中,实现油水分离。其中,直管质量流量计对 NG 乳化液进行流量和密度的检测,PLC 将来自质量流量计的信号进行采集并进行数据处理,计算出 NG 的瞬时质量流量和一段时间内的累计质量流量,并将计量的结果直接显示在显示界面上。

2.3 计量数据处理方法

NG 与水混合液流经直管质量流量计时,可测得混合液的质量流量 q_m 、体积流量 q_v 与不同温度下的密度 $\rho_{混}$,通过 PLC 控制器进行数据采集,在 NG 密度 ρ_{NG} 与水的密度 $\rho_{水}$ 已知的条件下,混合液中 NG 的瞬时质量流量 q_{mNG} 与一定时间内的累计质量流量 Q_{mNG} 可通过以下公式推出。

在混合液中:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_{混}} = q_{v水} + q_{vNG} = \frac{q_{m水}}{\rho_{水}} + \frac{q_{mNG}}{\rho_{NG}};$$
 (1)

$$q_m = q_{m水} + q_{mNG} \circ$$
 (2)

由式(1)和式(2),可以求得:

$$q_{mNG} = \frac{q_m(\rho_{混}\rho_{NG} - \rho_{NG}\rho_{水})}{(\rho_{混}\rho_{NG} - \rho_{水}\rho_{混})} \circ$$
 (3)

式(1)、式(2)、式(3)中, q_m 、 q_v 、 $\rho_{混}$ 为质量流量计测量的混合液的质量流量、体积流量及密度值; q_{mNG} 为 NG 的瞬时质量流量。在 $\rho_{水}$ 、 ρ_{NG} 确定的情况下,就可计算出 q_{mNG} ,再通过对时间的积分,便可算出一段时间内 NG 的累计质量流量:

$$Q_{mNG} = \int_0^t q_{mNG}(t) dt \circ$$
 (4)

式中: Q_{mNG} 为 t 时间段内 NG 的累计质量流量。

另外,为了保证计量精度,需补偿温度对密度的影响。通过试验,可以得出 NG 的密度随温度变化的曲线,由于实际生产过程中 NG 与水形成的混合液的温度变化范围较小,因此,NG 的密度 ρ_{TNG} 与温度 T 的关系可以近似认为是一元函数关系^[12]:

$$\rho_{TNG} = KT + \rho_{T_0NG} \circ$$
 (5)

在生产过程中,混合液的温度变化范围在 20 ~ 40 ℃ 之间,将 15 ~ 60 ℃ 范围内水的密度随温度变化的曲线画出来,经线性回归后,得出其密度随温度变化的一元二次函数为^[13]:

$$\rho_{T水} = -4e^{-0.67^2} - 7e^{-0.5T} + 1.0007 \circ$$
 (6)

式(5)、式(6)中: K 为常数; ρ_{TNG} 、 $\rho_{T水}$ 分别为 T 温度

时 NG 与水的密度; T 为标准状态下水的温度; ρ_{T_0NG} 为标准状态下 NG 的密度。

为了方便、直观地得到 NG 的瞬时质量流量与累计质量流量,避免每次繁琐的计算,在得到乳化液的瞬时质量流量、乳化液的瞬时密度以及温度的前提下,对式(1) ~ 式(6)进行编程化处理,并将最终处理得到的试验结果直接显示在设计好的显示屏上,可以直接从显示界面上得到 NG 的瞬时质量流量与累计质量流量。NG 计量显示界面如图 5。

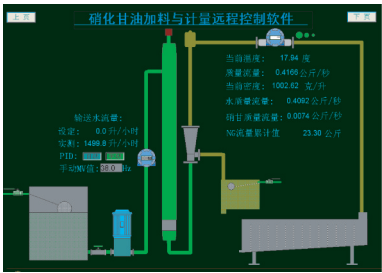


图 5 NG 计量显示界面

Fig. 5 Display interface of NG measurement

3 NG 在线连续计量试验

3.1 试验仪器与原料

在计量试验过程中,通过观察 NG 在喷液输送过程中瞬时质量流量的变化,评估输送过程的稳定性。通过将计量系统计量的质量流量结果与实际的质量流量进行对比,验证计量系统的准确性。

本次试验中所需的仪器与原料如表 2 所示。

表 2 试验原料与仪器

Tab. 2 Test materials and instruments

名称	厂家	型号
直管质量流量计	德国 Krohne 公司	Optimass 7300 C T15
输水泵	博大泵业有限公司	WZB100
压力表	上海亭山仪表厂	YTP-100MG
电子秤	南京精久电子衡器公司	KSDH
乳化喷射器	南京理工大学	非标
PLC 数据处理器	太原时代领航 科技公司	非标
硝化甘油	国营二四五厂	非标

3.2 管道压力对连续计量精度的影响

质量流量计进口端的流体压力对其计量的准确性有一定的影响^[14],为确定在对 NG 进行计量时最优的管道压力,在不同管道压力下对 NG 与水的乳化混合液进行计量试验。参照图 2,具体试验步骤:

将水槽中加满水,在暂储槽中加入 20 kg NG。使阀门 1 全开,关闭阀门 2,打开输水泵,待管道中的水流速稳定后,打开阀门 2,将 NG 吸入到乳化喷射器内与水乳化混合。调节阀门 3 的大小,控制管道的压力,使压力表 2 固定在某一数值。待储料槽中的 NG 被全部吸入后,记录显示界面上所给出的物料的累计值,与实际称量的 NG 值对比。然后改变管道的压力,重复上述操作。

在试验过程中,调节阀门 2 到最大时,此时质量流量计压力表 2 的示数为 0.31 MPa,故在本试验中,通过阀门调节,分别调至压力表 2 的示数为 0.10、0.15、0.20、0.25、0.31 MPa 时进行计量试验,以确定最佳的进口压力,结果见表 3。

表 3 质量流量计不同管道压力下计量结果
Tab.3 Measurement results of mass flowmeter under different pipe pressures

压力/ MPa	流量/ (kg·min ⁻¹)	计量值/ kg	实际值/ kg	相对误差/ %
0.10	9.62	18.96	20.00	5.20
0.15	10.76	19.46	20.00	2.70
0.20	11.53	20.21	20.00	1.05
0.25	13.36	19.93	20.00	0.35
0.31	14.99	19.92	20.00	0.40

由试验结果表 3 可知,在本试验条件下,对 NG 进行计量时,当管道的压力小于 0.20 MPa,管道中易产生气泡,影响了质量流量计检测精度,导致计量误差较大;当管道压力为 0.25、0.31 MPa(对应的流量分别为 13.36、14.99 kg/min)时,能满足质量流量计的检测要求,计量系统对 NG 在线连续计量的误差小于 0.5%。所以,通过调节阀门,使管道压力在 0.25~0.31 MPa 范围内,可提高质量流量计检测精度,以确保整个计量系统的稳定性、准确性。

3.3 NG 的在线连续计量

为验证 NG 在线连续计量系统的准确性及稳定性,对不同批次的 NG 进行计量试验。按照上述的试验操作,分别称取 15、20、25、30、35 kg 的 NG,并控制管道压力在 0.25~0.31 MPa 范围内进行计量试验,结果见表 4。

通过对不同批次的 NG 进行计量试验,由结果可以看出,计量误差均 <1.0%,满足对测量精确度的要求,说明该计量系统可以较好地实现 NG 的精确计量,可满足在火药生产过程中 NG 的在线连续计量的要求。

综上可以得出:建立的NG精确计量系统中,质

表 4 不同批次 NG 的计量结果
Tab.4 Measurement results of different batches of NG

批次	计量值/ kg	实际值/ kg	绝对误差/ kg	相对误差/ %
1	14.86	15.00	-0.14	0.93
2	19.83	20.00	-0.17	0.85
3	25.13	25.00	+0.13	0.52
4	29.85	30.00	-0.15	0.50
5	35.26	35.00	+0.26	0.74

量流量计可以准确地得出质量流量信号,PLC 能完成对信号的采集,且通过编程建立的模型能够很好地实现对数据的处理,并最终成功地显示在计量显示界面上。通过试验,说明建立的计量系统能很好地实现对 NG 的安全输送与精确计量,满足火药连续生产工艺对 NG 计量的精确度要求。

4 结论

利用乳化喷射器、直管质量流量计及 PLC 对 NG 进行了连续加料与计量试验,经计量试验研究,得出如下结论:

1)利用软件 Fluent 对 NG 的乳化喷液混合过程进行模拟分析,得到最佳的乳化喷射器结构参数为:喉管直径 14.33 mm,喉管长度 60.03 mm,喉嘴距 12.00 mm;在此结构参数下进行模拟分析得到:乳化喷射器出口处 NG 最大体积分数小于 30%,且所占节点比率小于 0.05,说明 NG 与水混合均匀,确保了 NG 安全连续输送。

2)在 0.1 MPa 到 0.3 MPa 范围内,不同入口处压力下,得出乳化喷射器的压降试验值与软件 Fluent 模拟时的压降模拟值较为接近,说明模拟的结果能真实地反映 NG 与水乳化混合情况。

3)研究了质量流量计在不同管道压力下对计量精度的影响,当管道压力为 0.25~0.31 MPa 时,能满足质量流量计检测要求,计量误差≤1.0%。

4)利用乳化喷射器、直管质量流量计及 PLC 开展了 NG 连续加料与计量试验,计量误差≤1.0%,能满足改性双基推进剂连续制备的工艺要求。

参 考 文 献

[1] 张军. 火药组分在线连续计量及工艺研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.

- [2] 朱陈森. 火药制备中 NG 的安全输送与计量技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
ZHU C S. Study on security transportation and measurement of NG [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [3] 柴涛, 刘玉存, 吕林川. 硝化甘油生产系统的安全分析 [J]. 中国安全科学学报, 1998, 8(4): 38-42.
CHAI T, LIU Y C, LÜ L C. Safety analysis in the process of nitro-glycerine production [J]. China Safety Science Journal, 1998, 8(4): 38-42.
- [4] 吕飞, 刘宏英. 吸收药在线实时计量技术研究 [J]. 新技术新工艺, 2012(5): 81-83.
LÜ F, LIU H Y. Study of on-line real time measurement technology of absorbent powder [J]. New Technology & New Process, 2012(5): 81-83.
- [5] 邓国栋, 刘宏英, 顾志明, 等. 硝化棉在线连续计量技术研究 [J]. 爆破器材, 2012, 41(1): 11-14.
DENG G D, LIU H Y, GU Z M, et al. Study on on-line continuous measurement technology of pure nitrocellulose weight [J]. Explosive Materials, 2012, 41(1): 11-14.
- [6] 骆培成, 程易, 汪展文, 等. 液-液快速混合设备研究进展 [J]. 化工进展, 2005, 24(12): 1319-1326.
LUO P C, CHENG Y, WANG Z W, et al. Research progress of liquid-liquid fast mixing equipment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(12): 1319-1326.
- [7] 张妍, 胡仰栋, 伍联营. 喷射混合器放大效应的计算流体力学模拟 [J]. 化学反应工程与工艺, 2013, 29(6): 495-501.
ZHANG Y, HU Y D, WU L Y. Computational fluid dynamics simulation on the scale-up effect in ejectors [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2013, 29(6): 495-501.
- [8] CRAMERS P H M R, BEENACKERS A A C M. Influence of the ejector configuration, scale and the gas density on the mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors [J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 82(1/2/3): 131-141.
- [9] 邓帆, 王国志, 于兰英, 等. 液压油引射器的性能研究 [J]. 机床与液压, 2015, 43(16): 85-86, 80.
DENG F, WANG G Z, YU L Y, et al. Performance research of the hydanlic oil ejector device [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(16): 85-86, 80.
- [10] CHIN A, ELLISON D, POEHLEIN S, et al. Investigation of the decomposition mechanism and thermal stability of nitrocellulose/nitroglycerine based propellants by electron spin resonance [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2007, 32(2): 117-126.
- [11] 曹宝友. 质量流量计在石化行业的应用 [J]. 石化技术, 2015(9): 41, 45.
CAO B Y. Application of mass flow meter in petrochemical field [J]. Petrochemical Industry Technology, 2015(9): 41, 45.
- [12] 泰皮. 含能材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 198-201.
- [13] 左正金. 水的密度计算及应用 [J]. 大坝观测与土工测试, 1989(3): 46-47.
- [14] 王欢. 介质压力变化对质量流量计准确度的影响 [J]. 石化技术, 2014, 21(4): 40-42.
WANG H. Influence of medium pressure change on accuracy of mass flow meter [J]. Petrochemical Industry Technology, 2014, 21(4): 40-42.