

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.01.006

井下乳化基质输送流变特性分析*

孙伟博^① 王 燕^① 胡 伯^②

①西安科技大学教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室(陕西西安,710054)

②煤炭工业规划设计研究院有限公司(北京,100120)

[摘 要] 井下乳化基质的流变特性对乳化基质长距离输送压力有很大影响。采用软固体测试流变仪对井下乳化基质在固定剪切率条件下进行了时变性测试,在变剪切率条件下进行了流型测试。测试数据和试验现象表明,乳化基质是一种触变性流体,其流动形态可以用 Hershal-Bulkley 流变模型来表示,测得的井下乳化基质的本构方程为 $\tau = 247.59 + 56.93\dot{\gamma}^{0.52}$ 。在输送井下乳化基质时,可以通过提前进行不破坏其稳定性的低剪切率搅拌的方法降低输送压力。

[关键词] 井下乳化基质;非牛顿流体;流变;输送

[分类号] TD235.2+1

引言

进行地下深孔爆破采用机械化装填乳化炸药时,乳化基质要通过小直径管路进行长距离输送到炮孔中。在乳化炸药的生产过程中,将一定比例的水、油相溶液混合并经适当机械作用(如搅拌、剪切等)后形成了 W/O 型结构的膏状乳化基质^[1-2]。由于乳化基质本身独特的油包水的结构特点,决定了乳化炸药在传质、传热等方面的独特性质。目前,关于乳化炸药流变特性方面的研究相对比较少,Cartwright^[3]认为它是幂律流体,流动曲线呈指数关系;Malkin^[4]将乳化基质的流动曲线拟合成 Cross 方程来表达;杨仁树等^[5]认为在较高温度(65~85℃)下,乳化炸药为幂律流体;邢宏龙^[6]认为乳化炸药基质是假塑性流体;姚普华^[7]认为乳化炸药符合幂函数运动规律,其流变指数 n 在 0.1~0.6 之间变化;郑峰、周向群等^[8-9]认为乳化炸药基质属于非牛顿流体中的塑性流体;Masalova 等^[10]研究了高浓度油包水型炸药的流变特性,对比了新制和保存一段时间的两种炸药的流变特性,认为前者的流动曲线符合 Cross 方程,后者则符合 Hershal-Bulkley 方程。

从前人的研究可以看出,乳化基质具体应属于哪种类型的非牛顿流体还没有确切的定论,这也许与乳化炸药的配方、生产工艺过程或采用的乳化器都不尽相同有关。露天现场混装乳化炸药基质与小直径包装乳化炸药基质的流变特性有明显的不同,

但同一类型的乳化炸药基质其流变特性,特别是输送流变特性是相似的。井下乳化炸药基质为适应井下上向炮孔装填的需要必须具有一定的黏度,同时要有一定的流动性,这一类乳化基质的输送流变特性是相近的。因此,要进行乳化基质的长距离输送,首先需要弄清井下乳化基质的流变性能。

1 试验方法

由于地下爆破时,主要关心的是乳化基质的输送性能,工作环境温度多在 20℃ 以上,因此就仅对实际生产使用时使用的常温状态下的乳化基质进行流型测试。

使用美国 Brookfield 公司生产的 R/S-SST 软固体测试流变仪对高黏度井下乳化基质的流变性进行测试。试验条件为:恒温 26℃,测量使用 V3-40-20 桨式转子,该转子的黏度测量参数范围为 0.217~70 000 Pa·s,剪切率为 0~235.5 s⁻¹,剪切应力为 51~1 700 Pa。

乳化基质是一种油包水型的乳状液,其油相材料特别是乳化剂,对于乳化基质的成乳速度、成乳后乳状液的稳定性、乳化基质的储存期有一定影响,但对乳化基质的流变特性影响不大。本试验的对象为生产后常温状态下的井下专用乳化基质,其配比如表 1 所示。主要原材料为硝酸铵、硝酸钠、水、柴油、机油和乳化剂,其中乳化剂为以聚异丁烯丁二酸酐为基础的高分子乳化剂。采用一级搅拌粗乳、一级

* 收稿日期:2014-03-13

基金项目:西安科技大学博士启动基金(2014QDJ021)

作者简介:孙伟博(1979~),主要从事矿山爆破及装备方面的研究。E-mail:sweibo@163.com

表 1 井下乳化基质配比

Tab. 1 Matching of underground emulsion matrix

组分	硝酸铵	硝酸钠	水	柴油	机油	高分子 乳化剂
质量 分数	71 ~ 74	3 ~6	16 ~ 18	2.2 ~ 2.9	1.5 ~ 2.0	1.2 ~ 1.8

精乳的两级乳化工艺。

试验时,首先在 250 mL 烧杯内装入约 200 mL 井下乳化基质,将烧杯固定在底座中央;然后将 V3-40-20 桨式转子插入装有乳化基质的烧杯中,并确保桨叶全部没入乳化基质中,且没有触及烧杯底部。启动流变仪测量功能,流变仪将自动在采样时间内进行测量记录。测量完成后,将转子从乳化基质中提起,用玻璃棒将烧杯中乳化基质抹平,然后将转子插入乳化基质进行下一次测量。

试验分为两个部分。第 1 部分试验为乳化基质的时变性试验,通过试验分析井下乳化基质是否具有时变性。试验方法为:固定剪切率在 3、30、100 s⁻¹条件下,测量其表观黏度,采样点为 100 个,采样时间 100 s。第 2 部分试验为乳化基质流型试验,通过试验分析乳化基质属于哪种流体类型,并得到其本构方程。试验方法为:控制剪切率从 1 s⁻¹均匀变化至 200 s⁻¹,测量其剪切应力的大小,采样点为 50 个,采样时间 200 s。

2 试验结果与分析

第一部分试验结果(节选)如表 2 所示,表中 η 为表观黏度。

表 2 井下乳化基质时变性测量数据

Tab. 2 Time-varying measurement data of underground emulsion matrix

序号	剪切率/(s ⁻¹)					
	3		30		100	
	t/ s	η / (Pa·s)	t/ s	η / (Pa·s)	t/ s	η / (Pa·s)
1	1	80.715	1	12.661	1	5.034
2	10	80.623	10	11.335	10	4.974
3	20	78.978	20	10.848	20	4.995
4	30	76.897	30	10.230	30	4.934
5	40	76.167	40	9.895	40	5.023
6	50	75.303	50	9.709	50	4.970
7	60	73.943	60	9.694	60	4.969
8	70	72.911	70	9.680	70	5.021
9	80	71.828	80	9.560	80	5.073
10	90	70.686	90	9.586	90	5.059
11	100	70.221	100	9.505	100	5.057

将测得的试验数据绘制成图,如图 1 所示。

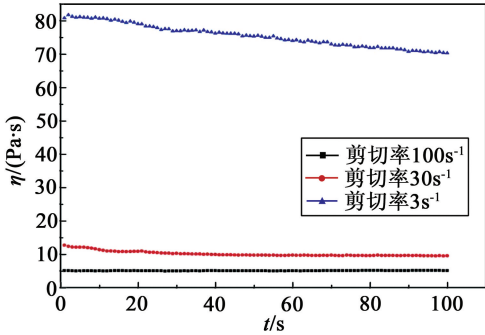


图 1 不同剪切率下表观黏度与时间关系

Fig. 1 Relationship between apparent viscosity and time at different shear rates

从图 1 中可以看出,井下乳化基质的表观黏度随剪切时间的变化而变化,且在高剪切率的情况下更快地达到稳定的表观黏度。这说明井下乳化基质是一种时变性流体,且表观黏度随剪切时间的增加而减小,说明是时变性流体中的触变性流体。触变性流体的黏度不仅随剪切速率的变化而变化,而且在恒定剪切速率条件下,黏度还随时间的推移而下降,最终达到一恒定值。当剪切作用停止后,流体的黏度随着时间的增加,还可以缓慢恢复到最初的黏度值。

在试验过程中还发现乳化基质有图 2 中的情况出现,这是一种典型的“爬杆”现象,这说明乳化基质同时还具有黏弹性。所以井下乳化炸药基质是一种黏度函数与剪切持续时间有关、而且还存在法向应力差的黏弹性流体。

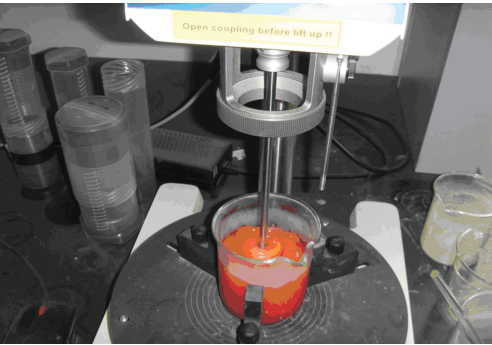


图 2 井下乳化炸药基质“爬杆”现象

Fig. 2 "Climbing" phenomenon of underground emulsion explosive matrix

由于井下乳化炸药基质是黏弹性流体,所以,对第 2 部分试验过程进行调整,在进行完第 1 次测量后,让转子在基质内以 5 s⁻¹的剪切率旋转 200 s 后再进行第 2 次测量。当进行第 4 次测量时发现与第 3 次测量值基本一致,至此试验停止,记录前 3 次试验,试验数据(节选)见表 3。

表 3 井下乳化基质流变试验数据

Tab.3 Rheological test data of underground emulsion matrix

emulsion matrix					
第 1 次		第 2 次		第 3 次	
剪切率	剪切应力	剪切率	剪切应力	剪切率	剪切应力
$\dot{\gamma}/s^{-1}$	τ/Pa	$\dot{\gamma}/s^{-1}$	τ/Pa	$\dot{\gamma}/s^{-1}$	τ/Pa
1.0	361.4	4.1	411.0	1.0	288.2
21.3	662.1	20.4	589.1	21.3	532.0
41.6	808.4	40.8	719.1	41.6	648.8
61.9	901.2	61.2	817.4	61.9	736.9
82.2	986.5	81.6	893.2	82.2	807.8
102.5	1 066.4	102.0	952.5	102.5	870.2
122.8	1 143.2	122.4	1 017.5	122.8	928.7
143.1	1 191.9	142.9	1 090.2	143.1	990.9
163.4	1 214.7	163.3	1 153.7	163.4	1 048.6
183.8	1 245.8	183.7	1 211.0	183.8	1 110.7

根据表 3 中试验数据绘制剪切应力与剪切率散点图,如图 3 所示。

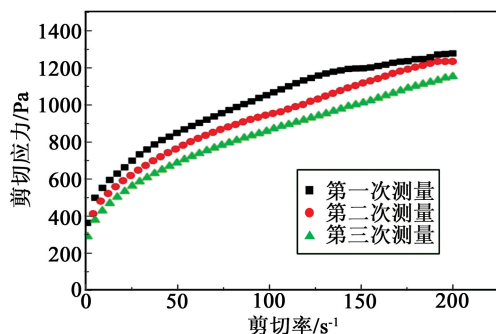


图 3 井下乳化基质剪切应力与剪切率关系

Fig.3 Relationship between shear stress and shear rate of underground emulsion matrix

从图 3 中可以看出,3 次试验测量出剪切率和剪切应力曲线均不相同,且第一次测量的曲线最高,这也说明井下乳化基质属于触变性流体,只有当经过一定时间的剪切变形达到平衡结构后,才能得到稳定的流变参数。所以,在进行井下乳化炸药基质输送时,提前对井下乳化炸药基质进行不破坏其稳定性的低剪切率的搅拌,可以在一定程度上降低其输送压力。从图 3 中还可以看出,井下乳化基质属于非牛顿流体,存在明显的屈服值。对第 3 次测量的结果按非牛顿流体的各种类型的本构方程进行拟合,发现其与 Hershal-Bulkley 型流体的本构方程最为接近,如图 4 所示。

1926 年赫谢尔-巴尔克莱 (Herschel-Bulkley) 在研究橡胶溶液的流变性时,提出了带屈服值的幂律流变模式^[11],即 Herschel-Bulkley 流变模型。在国内,通常将符合该流变规律的流体称为赫谢尔-巴尔

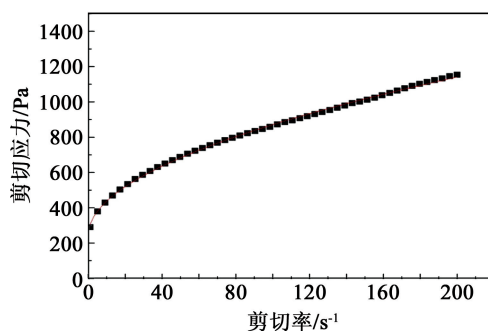


图 4 井下乳化基质剪切应力与剪切率关系拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of the relation between the shear stress and shear rate of underground emulsion matrix

克莱流体,简称赫-巴流体。Herschel-Bulkley 流变模型能够较精确地表示出各种剪切速率与剪切应力的关系,适应范围较广,特别在剪切速度较低的情况 ($\dot{\gamma} < 150 s^{-1}$),其准确性大大高于常用的宾汉姆流变模式及指数流变模式^[12]。

Herschel-Bulkley 型流体的本构方程为:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力; τ_0 为屈服应力; K 为稠度系数; n 为流性指数。

当 $\tau_0 = 0$ 时, $n = 1$,则表示牛顿流体; $n > 1$,则表示膨胀性流体; $n < 1$,则表示假塑性流体。当 $\tau_0 \neq 0$ 时, $n = 1$,则表示宾汉姆流体。

可见, Hershal-Bulkley 流变模型既可以反映流体流动时的塑性特征,又可以反映流体流动时的假塑性特征,所以它包含了宾汉姆流体和幂律流体这两种流变模式的特点。

按照 Hershal-Bulkley 流变模型进行数据拟合,非线性拟合公式选择 $y = a + bx^c$,拟合后得到 $a = 247.59$, $b = 56.93$, $c = 0.52$,从而得到测量的乳化基质的本构方程为:

$$\tau = 247.59 + 56.93\dot{\gamma}^{0.52} \quad (2)$$

3 结论

通过使用流变仪对井下乳化基质的输送流变特性进行测试得出:

井下乳化基质是一种具有触变性的非牛顿流体,其流动形态可以用 Hershal-Bulkley 流变模型来表示,其本构方程为 $\tau = 247.59 + 56.93\dot{\gamma}^{0.52}$ 。

由于井下乳化基质具有触变性,在进行井下乳化炸药基质输送时,提前对井下乳化炸药基质进行不破坏其稳定性的低剪切率的搅拌,可以在一定程度上降低其输送压力。

参 考 文 献

- [1] 何劲松,何欣扬. 对乳化基质快速敏化的几点认识[J]. 爆破器材, 2008, 37(1): 12-14.

- He Jinsong, He Xinyang. Some cognition on fast sensitization of emulsified bases[J]. *Explosive Materials*, 2008, 37(1):12-14.
- [2] 王尹军,汪旭光. 乳胶基质抗冲击波性能研究[J]. *兵工学报*, 2005, 26(5):697-700.
Wang Yinjun, Wang Xuguang. A study on the anti-shockwave performance of emulsion matrix [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(5):697-700.
- [3] Cartwright R V. Rheology of emulsion explosives; a practical method[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1989, 14(5):215-218.
- [4] Malkin A Y, Masalova I, Slatter P, et al. Effect of droplet size on the rheological properties of highly-concentrated W/O emulsions [J]. *Rheologica Acta*, 2004, 43(6):584-591.
- [5] 杨仁树,李清,田运升,等. 乳化炸药异常流变性与其微观稳定性的关系[J]. *煤炭学报*, 1997, 22(2):160-164.
Yang Renshu, Li Qing, Tian Yunsheng, et al. The bizarre rheologic properties and microscopic stability of emulsion explosives[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(2):160-164.
- [6] 邢宏龙. 乳化炸药基质流变性能的研究[J]. *煤矿爆破*, 1999(3):2-4.
- [7] 姚普华. 乳化炸药管路输送压力的计算[J]. *长沙矿山研究院季刊*, 1991, 11(2):51-55.
Yao Puhua. Pressure calculation for pipe transport of emulsion explosives [J]. *Quarterly of CIMR*, 1991, 11(2):51-55.
- [8] 郑峰,杨民刚. 乳化炸药流变特性的测试[J]. *爆破器材*, 1993(2):4-6.
Zheng Feng, Yang Mingang. Testing on rheological characteristics of emulsion explosives [J]. *Explosive Materials*, 1993(2):4-6
- [9] 周向群,郑峰. 乳化炸药流变特性的测试[J]. *测试技术学报*, 1998, 12(4):24-27.
Zhou Xiangqun, Zheng Feng. Testing on rheological characteristics of emulsion explosives [J]. *Journal of Test and Measurement Technique*, 1998, 12(4):24-27.
- [10] Masalova I, Malkin A Y, Slatter P, et al. The rheological characterization and pipeline flow of high concentration water-in-oil emulsion [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanic*, 2003, 112(3):101-114.
- [11] Herschel W H, Bulkley R. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions [C]//*Proceedings of the American Society of Testing Materials*, 1926, (26):621-655.
- [12] 西南石油学院固井科研组. 适合钻井液及水泥浆的赫谢尔-巴尔克莱 (Herschel-Bulkley) 流变模式及其应用[J]. *西南石油学院学报*, 1983(4):1-16.
Cementing Research Section. Herschel-bulkley rheological model of drilling fluid and cement slurry and its application [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1983(4):1-16.

Rheological Property Analysis of Transporting Underground Emulsion Matrix

SUN Weibo^①, WANG Yan^①, HU Bo^②

^①Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention,

Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology (Shaanxi Xi'an, 710054)

^②Planning and Design Research Institute of Coal Industry Co., Ltd. (Beijing, 100120)

[ABSTRACT] The rheological properties of underground emulsion matrix have a great influence on the pressure of long distance transport of emulsion matrix. Soft solid test rheometer was used to test the time-variability of underground emulsion matrix at a fixed shear rate and the flow of underground emulsion matrix at the variable shear rate conditions. Analysis of the test data of underground emulsion matrix and the experimental phenomenon shows that underground emulsion matrix is a kind of thixotropic fluid, and the flow patterns can be used to represent the Herschel-Bulkley rheological model. The constitutive equation of underground emulsion matrix is $\tau = 247.59 + 56.93\dot{\gamma}^{0.52}$. In the delivery of underground emulsion matrix, the delivery pressure could be reduced by low shear rate of stirring method in advance without destroying the stability.

[KEY WORDS] underground emulsion matrix; non-Newtonian fluid; rheological; transporting