

尾砂充填料浆流变性能模型与试验研究

蔡嗣经^{1,2}, 黄刚^{1,2}, 吴迪³, 张亚东^{1,2}

(1. 北京科技大学 教育部金属矿山高效开采与安全重点实验室, 北京 100083;

2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083;

3. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘 要: 以地下矿山尾砂充填料为研究对象, 试验研究与理论分析相结合的方法, 利用 R/S + 流变仪和岩石力学试验机对充填料浆的流变性能进行试验研究. 引入 Papanastasiou 黏塑性流体模型来表征尾砂充填料浆的黏度和切应力变化过程. 研究表明: 该黏塑性流体模型预测的结果和试验结果相吻合, 因此可用于理论分析计算; 得到不同的压力增长指数下切应力-切变速率曲线; 尾砂充填料浆的黏度和屈服应力随料浆质量分数的增加而增大; 同一质量分数下, 胶结尾砂的黏度和屈服应力比全尾砂大. 通过对充填料浆流变性能的研究, 为矿山充填设计提供了理论和实验依据.

关 键 词: 充填采矿法; 尾砂充填料浆; 黏塑性流体; 屈服应力; 流变性能

中图分类号: TD 853

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)06-0882-05

Experimental and Modeling Study on the Rheological Properties of Tailings Backfill

CAI Si-jing^{1,2}, HUANG Gang^{1,2}, WU Di³, ZHANG Ya-dong^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for High Efficiency Exploitation and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Department of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China. Corresponding author: HUANG Gang, E-mail: huanggang1029@126.com)

Abstract: Taking backfill material for underground mine as the object of study, this paper aims to studying its rheological properties and strength characteristics by using the R/S + rheometer and rock mechanics testing machine with the methods of experiment and theory analysis. And the visco-plastic fluid model of Papanastasiou was introduced to analyze the changing progress of viscosity and shear stress of tailings backfill. The results show that, the calculated results of this model were identical to the experimental results, thus it could be verified for theoretical calculation. In addition, the curve of shear stress-shearing rate at the different stress growth parameter was gotten, it is found that the viscosity and yields stress of backfilling develop with the increase of its mass concentration and the viscosity and yields stress of cementing tailings were higher than those of whole tailings at the same mass concentration. This study on rheological properties of tailings backfill are useful for designing filling station in mine.

Key words: mining with backfill; tailings fill; visco-plastic fluid; yield stress; rheological properties

20 世纪 60 年代以来, 尾砂充填采矿得到了迅速发展^[1], 该方法是利用尾矿进行胶结充填的采矿方法, 能高效利用矿山的全部尾矿. 这不仅减

少了工业废料造成的环境污染, 还可以降低矿山的充填成本^[2]. 由于不需要进行尾砂分级、充填料输送性能好、采空区充填后无需脱水、充填效率

高,尾砂充填采矿法成为当今世界最重要的一类采矿方法^[3].其关键技术是充填料浆的制备、输送和充填体的强度,所以研究充填料浆的流变性能和强度特性对提高充填效率和安全有着重要的意义^[4].近十几年,国内外学者对尾砂胶结充填做了很多研究.如胡尊杰等从流变特性、抗压强度和乳化时间三个因素考虑,来确定充填料的浓度、水灰比以及添加剂^[5];国内外对粉煤灰尾砂胶结充填料的流变性能进行了研究^[6-9].

本文在这些研究成果的基础上,结合某地下矿山,利用 Bingham 流体模型及 Papanastasiou 提出的连续性流体模型,以理论分析与试验相结合的方法,分析了某矿山尾砂的级配、物理参数和充填料的流变性能,得出全尾砂和胶结尾砂充填料浆切应力随切变速率的曲线,该成果可以为地下采场的充填料浆制备和输送提供依据,具有现实指导意义.

1 全尾砂充填料浆塑性流体模型

充填材料的水力输送,涉及到流体力学的诸多领域.在流体力学中,全尾砂膏体充填料浆属于塑性结构流体.塑性流体的黏度不是常数,此外,塑性流体要克服起始屈服应力 τ_0 才能流动.而黏度是随着时间和切变速度变化的.所以全尾砂充填料浆可以当做是 Bingham 塑性体或者是 Herschel-Bulkley 流体^[10].描述此流体最简单的本构方程为^[11]

$$\left. \begin{aligned} \dot{\gamma} &= 0, & \tau &\leq \tau_0; \\ \tau &= \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu \right) \dot{\gamma}, & \tau &> \tau_0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: τ_0 为屈服应力, Pa; μ 为黏度, Pa·s; τ 为切应力, Pa; $\dot{\gamma}$ 为切变速率, s^{-1} .

$$\dot{\gamma} = \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T. \quad (2)$$

式中 \mathbf{u} 为速度矢量,上标 T 是速度梯度矩阵 $\nabla \mathbf{u}$ 的转置. τ 和 $\dot{\gamma}$ 分别由下式表示:

$$\tau = \left[\frac{1}{2} \tau : \tau \right]^{\frac{1}{p}}, \dot{\gamma} = \left[\frac{1}{2} \dot{\gamma} : \dot{\gamma} \right]^{\frac{1}{p}}. \quad (3)$$

当切变速率趋于零时,理想的 Bingham 弹性模型是非连续性的,所以在理论分析和模拟计算过程中有很多不便.为了克服这种不便,就要根据两个方程拟合出一个连续性方程.最著名的方程是 Papanastasiou^[12]提出的切应力和黏度方程:

$$\tau = \left\{ \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} [1 - \exp(-m\dot{\gamma})] + \mu \right\} \dot{\gamma}, \quad (4)$$

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} [1 - \exp(-m\dot{\gamma})]. \quad (5)$$

式中: $\mu(\dot{\gamma})$ 是黏度随切变速率变化的函数; m 是压力增长指数.

在计算时,式(4)、(5)可以应用于塑性流体处于屈服阶段或未屈服阶段.当 m 趋近于 0 时,上述模型就是牛顿流体;当 m 趋近于无穷大时,方程(4)就可以表示 Bingham 模型. m 取值较大时,随着切变速率的增加,黏度趋近于 μ .在未屈服阶段,当切变速率较小时,黏度 μ 很大;当切变速率趋近于 0 时,黏度 μ 的值为 $\mu + m\tau_0$.

2 尾砂充填料浆流体试验

选取某矿山的尾砂作为研究材料,进行充填体料浆流变性能的试验研究.研究方法和数据资料为矿山充填工作提供了依据.

2.1 尾砂基本物理参数和颗粒分级

1) 尾砂的密度、容重、孔隙率对充填料浆的配比和充填体强度的影响较大,在试验前对这些参数的测定为下一步工作做好准备.该试验尾砂的基本物理参数如表 1 所示.

充填材料的孔隙率是表示充填料质量的重要参数,其值反映了充填体的密实程度.对充填体材料来说,则进一步反映了充填体的强度特性.

表 1 尾砂密度、容重、孔隙率测定结果
Table 1 The specific gravity, volume-weight, porosity of tailings

材料	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	松散容重 $t \cdot m^{-3}$	密实容重 $t \cdot m^{-3}$	孔隙率/%
全尾砂	2.63	1.09	1.46	44.49

2) 颗粒大小的分布情况(即级配),是影响其力学性质的最重要物理参数.该全尾砂粒度的组成曲线如图 1 所示.

从图中可以看出,该矿山的尾砂级级主要分布在 0~0.18 mm 之间.

2.2 充填料浆的流变参数试验

根据 2.1 节理论分析可知,充填料浆是黏塑性流体,可以当作是 Bingham 模型.根据方程(6)可知,和料浆流变性能相关的参数是屈服应力 τ_0 和塑性黏度 μ .本次使用 Brookfield 公司生产的 R/S+ 流变仪进行全尾砂和胶结尾砂料浆的流变参数试验.

采用质量分数为 66%、68%、70% 三种料浆进行全尾砂和胶结尾砂充填料浆的流变参数测定.其中胶结尾砂的灰砂质量比为 1:8.

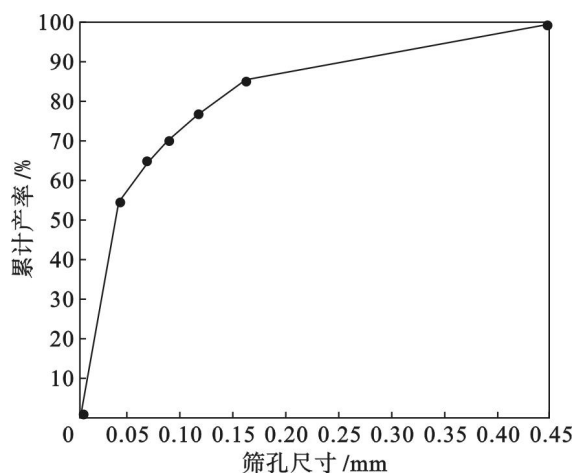


图 1 全尾砂粒级组成

Fig. 1 Composition of size of whole tailings

2.2.1 试验结果

文中只罗列了料浆质量分数为 66% 时,胶结尾砂黏度随时间变化曲线和回归分析曲线,如图 2 所示。

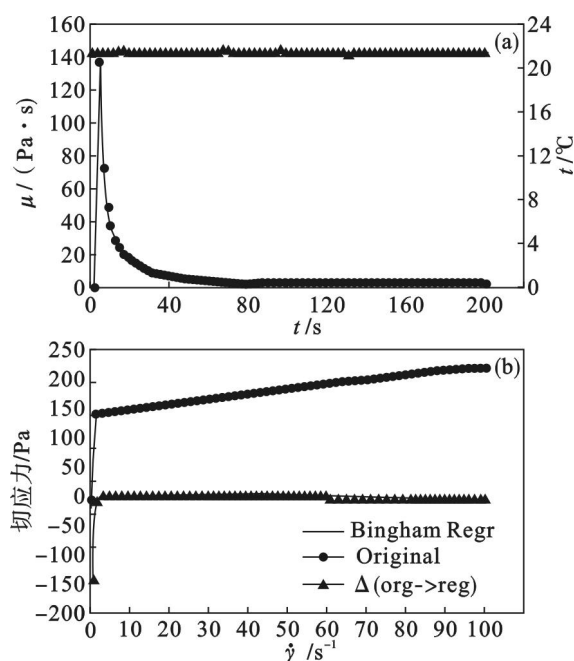


图 2 充填料浆质量分数为 66% 时胶结尾砂黏度曲线和回归分析曲线

Fig. 2 Viscosity curves of cemented tailings with pulp density of 66%

(a)—黏度曲线; (b)—回归分析曲线。

2.2.2 试验结果分析

图 2a 是试验过程中料浆的塑性黏度和温度随时间的变化曲线。Bingham 塑性流体切应力和切变速率之间的函数关系如下:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (6)$$

式(6)中的各参数意义如前所述。图 2b 是经过 Bingham 回归分析得到的曲线图。由图可知,

切应力是切应变率的函数,即 $\tau = f(\dot{\gamma})$ 。可以得到 τ_0 和 μ 的值如表 2 所示。代入到式(6)中就可以得到 Bingham 流体的本构方程,三种质量分数的全尾砂和胶结尾砂的流体本构方程见表 2。

2.3 充填料浆的流变性能

通过试验得到 Bingham 流体的两个重要参数,及表 2 中得到的流体本构方程,结合式(4)和式(5)中的理论公式,对充填料浆的流变性能进行分析。

2.3.1 压力增长指数

式(4)是 Papanastasiou 提出来的描述流体的本构方程。 m 是压力增长指数,不同的情况下取值不同。根据质量分数为 66% 全尾砂充填料浆试验所得的黏度和屈服应力,结合图 1 中的回归曲线,取不同的 m 值所得的理论曲线如图 3 所示。

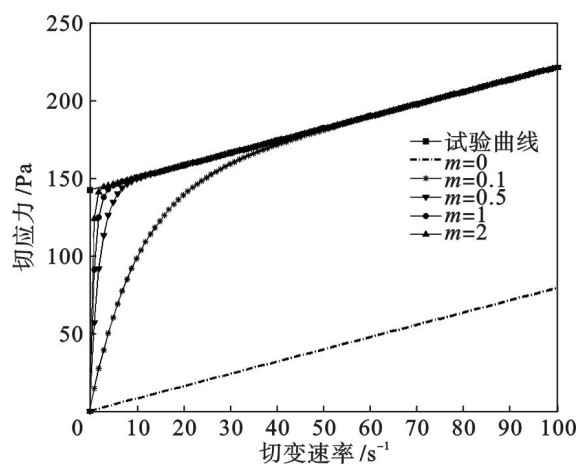
图 3 不同的 m 值切应力—切变速率曲线

Fig. 3 Relationship curves of shear stress-shearing rate at different stress growing index

2.3.2 充填料浆流变性能分析

在此次试验设计中,从料浆质量分数和是否胶结两个方面来分析其对充填料浆流变性能的影响。分析结果如下。

1) 切应力试验和理论曲线的分析对比。充填料浆的切应力随切变速率变化的试验值和模型预测值如图 4,图 5 所示。

由图中可知,全尾砂和胶结充填料浆中,随着充填料浆质量分数的增加,流体的屈服应力随之增加。胶结充填料浆相对于全尾砂充填料浆,在质量分数相等的前提下,其屈服应力都比全尾砂充填料浆大。影响充填料浆流体的流变性能因素中,充填料浆的质量分数对其影响较大,充填料浆是否加入胶结材料对充填料浆的流变性能影响很大。

通过对试验值和模型预测值的对比,由图中可以看出,在初始阶段,随着切变速率的增加,切应力是一个快速增长的趋势,当切变速率达到一定时,其曲线和试验所得的直线重合。

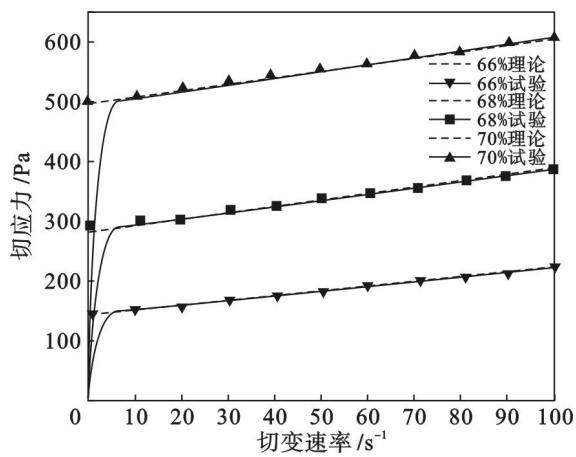


图 4 全尾砂充填料流体本构方程理论值和试验值曲线图

Fig. 4 Theoretical and experimental relationship of stress-strain of total tailings backfill

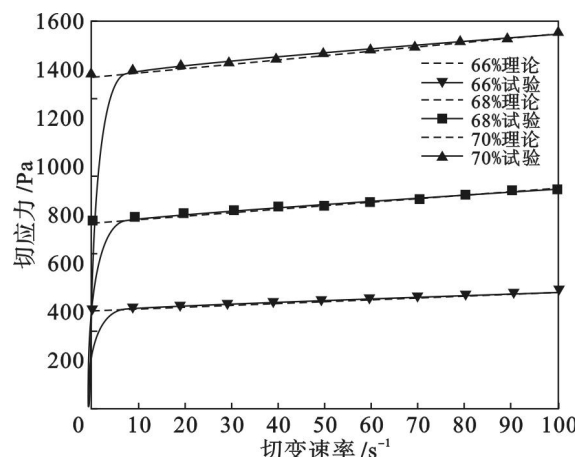


图 5 胶结尾砂充填料流体本构方程理论值和试验值曲线图

Fig. 5 Theoretical and experimental relationship of stress-strain of cemented tailings backfill

表 2 试验结果统计
Table 2 List of statistics of experimental results

尾砂充填料	灰 砂 质量比	黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	屈服应力 τ_0/Pa	回归方程
全尾砂(66%)	—	0.79	142.09	$\tau = 142.09 + 0.79\dot{\gamma}$
胶结尾砂(66%)	1:8	0.82	393.20	$\tau = 393.20 + 0.82\dot{\gamma}$
全尾砂(68%)	—	1.02	286.06	$\tau = 286.06 + 1.02\dot{\gamma}$
胶结尾砂(68%)	1:8	1.45	759.61	$\tau = 759.61 + 1.45\dot{\gamma}$
全尾砂(70%)	—	1.10	498.65	$\tau = 498.65 + 1.1\dot{\gamma}$
胶结尾砂(70%)	1:8	1.83	1 363.15	$\tau = 1\,363.15 + 1.83\dot{\gamma}$

2) 黏度试验和理论曲线的分析对比. 由图 2a 可知,黏度在初始阶段有一个突降的过程,最后趋于稳定. 式(5)是 Papanastasiou 模型关于黏度的一个表达式. 通过对试验结果和模型的预测结果的对比,黏度随时间的变化对比曲线如图 6 所示.

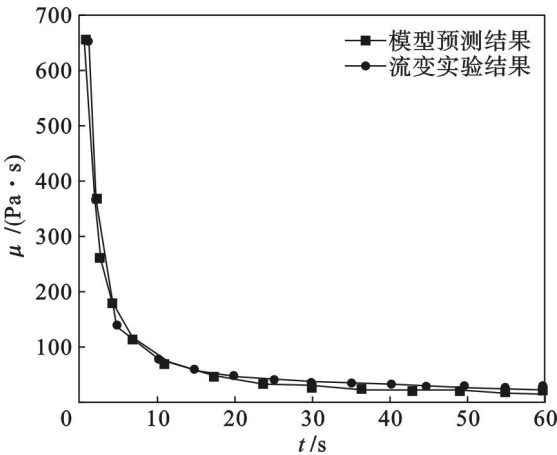


图 6 流变试验结果与模型预测结果对比图
Fig. 6 Comparing curves of experimental and predicting results of tailings backfill

由试验得出的黏度随时间变化曲线与 Papanastasiou 模型预测的结果很吻合,所以该模型可用于研究和预测充填料浆黏度随时间的变化. 全尾砂和胶结尾砂黏度对比图、不同质量分数的全尾砂黏度对比图分别如图 7,图 8 所示.

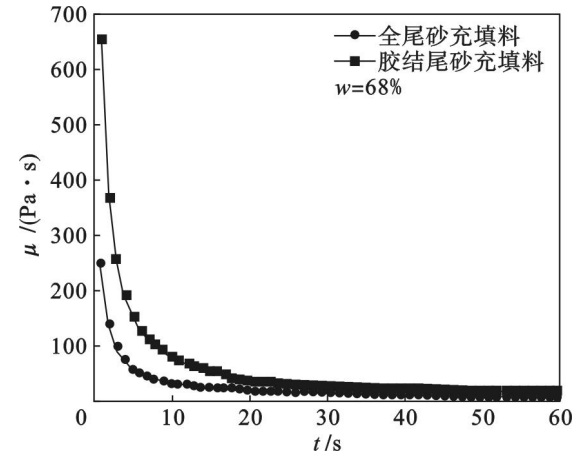


图 7 充填料浆黏度-切变速率理论分析曲线
Fig. 7 Theoretical analysis curves of viscosity-shearing rate of backfill

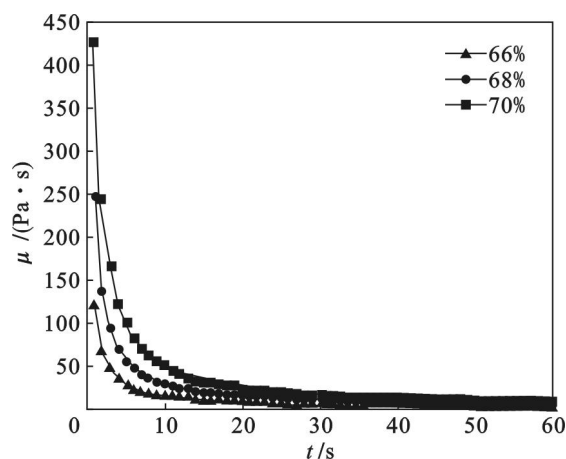


图 8 不同质量分数全尾砂充填料浆黏度-时间理论分析曲线

Fig. 8 Theoretical analysis curves of viscosity-time of total backfill at different concentration

由图 7 和图 8 可知,随着充填料浆质量分数的增大,黏度增加。初始阶段相差较大,趋于稳定后相差较小。胶结尾砂的黏度相对于同一质量分数下的全尾砂,其黏度比全尾砂充填料浆大。

3 结 论

1) 利用 R/S + 流变仪得到不同质量分数的全尾砂和胶结尾砂充填料浆的黏度随时间变化的曲线,回归分析得出充填料浆塑性流体的切应力-切变速率曲线图。

2) 充填料浆屈服应力和黏度随着质量分数的增加而增大,且胶结尾砂的屈服应力和黏度相对于全尾砂充填料浆要大。

3) 对充填料塑性流体 Papanastasiou 模型进行分析,得出影响充填体料浆流变性能的影响因素。不同的压力增长指数对该模型的影响说明指数越大,越接近黏塑性流体实际特征。并结合试验结果进行对比,结果相当吻合,说明该塑性流体连续性模型在取合适的压力增长指数时,可以用于流体切应力的计算中。

参考文献:

[1] 翟永刚,吴爱祥,王洪江. 全尾砂膏体充填临界质量分数[J]. 北京科技大学学报,2011,33(7):795-799.
(Zhai Yong-gang, Wu Ai-xiang, Wang Hong-jiang. Threshold mass fraction of unclassified-tailings paste for backfill mining[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(7):795-799.)

[2] 韩冰,吴爱祥,邓建. 基于可靠度理论的下向进路胶结充填技术分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2006,37(3):583-588.
(Han Bing, Wu Ai-xiang, Deng Jian. Backfill technical analysis based on reliability theory in the underhand drift cut-and-filling stoping[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2006, 37(3):583-588.)

[3] Zhang T J, Ma M N, Wang H S, et al. A nonlinear rheological model of backfill material for retaining roadways and the analysis of its stability[J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2011, 21(4):543-546.

[4] Lorenzo F, Angiolo F, Fabio R. Flow of a Bingham-like fluid in a finite channel of varying width: a two-scale approach[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2012, 177/178(4):76-88.

[5] 崔刚,陈文楷,段鸿杰. 胶结充填料浆合理配比的确定[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(3):311-317.
(Cui Gang, Chen Wen-kai, Duan Hong-jie. Choice of component ratio of cemented backfill pulp[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(3):311-317.)

[6] 吴迪,蔡嗣经,杨威,等. 基于 CFD 的充填管道固-液两相流输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报,2012,22(7):28-33.
(Wu Di, Cai Si-jing, Yang Wei, et al. Simulation and experiment of backfilling pipeline transportation of solid-liquid two-phase flow based on CFD[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(7):28-33.)

[7] Alexandros S, Georgios C G, Andreas N A. Solution of the square lid-driven cavity flow of a Bingham plastic using the finite volume method[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013, 195(1):19-31.

[8] Olivier P, Mostafa B. Alternative by-product based binders for cemented mine backfill: recipes optimisation using Taguchi method[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 29(2):28-35.

[9] Fall M, Adrien D, Celestin J C, et al. Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(8):1307-1314.

[10] Georgios C F, Andreas N A, Georgios C G. Flow development in compression of a finite amount of a Bingham plastic[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2007, 143(1):38-45.

[11] Vinay R G, Jan-Aiso L N, Paul B, et al. Development and validation of a CFD model predicting the backfill process of a nuclear waste gallery[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(4):2508-2514.

[12] Sérgio F, Filipe S S, Flávia Z. Stabilized mixed approximations for inertial viscoplastic fluid flows[J]. *Mechanics Research Communications*, 2010, 37(1):145-151.