

DOI: 10.11779/CJGE201901018

低温环境下南海海底泥流的流变试验及模型

郭兴森¹, 年廷凯^{1, 2, 3}, 范 宁¹, 焦厚滨¹, 贾永刚³

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 3. 中国海洋大学山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 海底泥流是海底斜坡失稳后演化的流态化滑坡体, 常对海洋工程设施造成严重破坏, 而目前针对这种泥流的流变特性研究较少, 特别是考虑海底低温环境。基于南海北部陆坡软黏土原状样制备泥流, 采用 RST 流变仪开展具有不同温度与含水率的泥流流变试验, 引入 Herschel-Bulkley 模型对流变参数进行深入探讨, 建立考虑低温效应与含水率变化的海底泥流综合流变模型。进一步, 通过相态转化、布朗运动与粒际作用的理论, 解释并分析了海底泥流的流变特征及其变化机理。研究表明: 与常温条件相比, 低温环境下泥流的剪应力与表观黏度显著提高, 且随着剪切速率的增加差距变大, 平均变化量可超过 35%。这一成果可为海底泥流运动过程数值模拟与海底滑坡灾害预测提供科学依据。

关键词: 南海; 海底泥流; 低温流变试验; 综合流变模型; 流变机理

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)01-0161-07

作者简介: 郭兴森(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事海洋土力学与海底滑坡等方面的研究工作。E-mail: gxs@mail.dlut.edu.cn。

Rheological tests and model for submarine mud flows in South China Sea under low temperatures

GUO Xing-sen¹, NIAN Ting-kai^{1, 2, 3}, FAN Ning¹, JIAO Hou-bin¹, JIA Yong-gang³

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The submarine mud flow, a fluidized landslide mass developed from the unstable submarine slope, is easy to cause a serious damage to the offshore engineering facilities. At present, there are rarely researches to discuss the rheological properties of this mud flow, particularly lacking of its characteristic studies considering the low temperatures around the seafloor. For this purpose, the mud flow is prepared by using undisturbed soft clay samped from the South China Sea, and many rheological tests under different temperatures and water contents are conducted by the RST rheometer. Then, the Herschel-Bulkley model is introduced to analyze the rheological parameters, and the integrated rheological model for the submarine mud flow is proposed. Further, the rheological characteristics and mechanisms of the submarine mud flow are analyzed by the phase transformation, the Brownian motion and the interparticle interaction. The research results show that the shear stress and apparent viscosity of the mud flow under the low temperatures significantly increase as compared with those under the room temperature, and this change percentage will further rise with the increase of the shear strain rate, and the average value of the change is more than 35%. This study may provide a scientific basis for the numerical simulation of submarine mud flows and the prediction of landslide hazards.

Key words: South China Sea; submarine mud flow; low temperature rheological test; integrated rheological model; rheological mechanism

0 引言

海底滑坡作为一种常见的海洋地质灾害, 可对影响区域内的能源管道、缆线、油气生产平台等海洋工程设施造成严重破坏^[1-2]。随着国家海洋战略的提出, 海底滑坡受到的关注与日俱增, 加深对滑坡体运动特

基 金 项 目: 国 家 重 点 研 发 计 划 项 目 (2016YFE0200100, 2018YFC0309203); 国 家 自 然 科 学 基 金 项 目 (51879036, 41427803); 深 部 岩 土 力 学 与 地 下 工 程 国 家 重 点 实 验 室 基 金 项 目 (SKLGDUEK1307); 山 东 省 海 洋 环 境 地 质 工 程 重 点 实 验 室 基 金 项 目 (MEGE1603)

收 稿 期 间: 2017-10-16

* 通 信 作 者 (E-mail: tknian@dlut.edu.cn)

征研究^[3]，可为海底滑坡预警、运移范围预测、冲击管线评估以及资源综合开发与利用提供科学依据^[4]。

海底泥流是海底斜坡失稳后，经复杂的水土交换作用与长距离运移演化的流态化滑坡体，具有高含水率、低剪切强度、剪切稀化等特点，属于超软土范畴内的流泥^[5]，也普遍被认为是一种非牛顿流体^[6]。目前，国内外学者很少针对海底泥流开展流变特性研究，主要关注河口、水库、湖泊、海湾泥沙以及泥石流样本的流变特性。考虑的影响因素包括含水率、密度、盐度、pH 值等。Berlamont 等^[7]认为泥沙流变特性展现了流动、阻力与自身结构的变化，指出高浓度泥沙流变特性测试的复杂性与困难性；Coussot 等^[8]研究了高岭土、黏土以及泥石流样本的流变特性，认为 pH 值、含水率、电解质浓度对流变特性影响明显；王裕宜等^[9]通过大型平板旋转式流变仪，对云南蒋家沟泥石流体进行现场测试，发现在低剪切速率时高浓度黏性泥石流体具有应力过冲现象与剪切稀化特征；Si^[10]研究了高岭土、硅砂、水不同组构混合物碎屑流的流变特性，Zakeri 等^[11]将其研究成果用于模拟海底滑坡及其对管线的冲击，但尚未考虑低温条件下海底泥流的流变特性。

南海北部大陆边缘发育了宽阔平坦的陆架与沿海盆方向水深迅速加大的陆坡^[12]，随着水深加大，海水温度降低。邹大鹏等^[13]提到南海北部海底沉积物存在着不同的表层温度，大陆架表面可达 25℃，接近于 1000m 水深处约为 2℃，大多数海底表层沉积物处于 0~4℃。显然，不同位置处海底沉积物温度差异较大，可能对沉积物流变特性产生重要影响。然而，受试验条件与研究范畴等制约，目前软黏土强度与泥流流变特性研究，多在常温条件下进行^[7,9-11]，未考虑低温环境与真实组构情况对海底泥流流变特性的影响。

基于上述现状，将南海北部陆坡区软黏土原状样重塑形成 3 种不同含水率的海底泥流，考虑深水区的海底低温环境，采用 RST 流变仪开展多组流变试验，并引入 Herschel-Bulkley 模型，建立考虑低温效应与含水率变化的海底泥流流变模型。

1 试验设计

1.1 试验仪器与测试原理

试验设备采用美国 Brookfield 公司生产的 RST 流变仪，搭配桨式转子，如图 1 所示。配备的桨式转子常被广泛用于非牛顿流体的流变特性测试，适用于黏土泥流材料^[14]，并定量评估流变行为^[15]。鲁双等^[16]通过微固结高岭土的流变强度测试，验证了 RST 流变仪与其测试方法的可靠性。RST 流变仪强度测试理论

为剪切柱体理论。测试时将转子插入土样，使用智能软件 Rheo3000 控制转子旋转，并通过内部传感器采集转子转动力矩，进而获得剪应力。对饱和软黏土而言，不排水剪切强度与所测剪应力近似相等^[17]。剪应力、剪切速率、表观黏度的计算公式分别为^[16]

$$s_u \approx \tau = \frac{2M}{\pi D^2 (H + D/3)} \quad , \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{r}{R-r} \omega \quad , \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad . \quad (3)$$

式中 τ 为剪应力 (Pa)； s_u 为不排水剪切强度 (Pa)； M 为扭矩 (N·m)； H 和 D 分别为转子的高度和直径 (m)； $\dot{\gamma}$ 为剪切速率 (s^{-1})； r 和 R 分别为转子和模型筒的半径 (m)； ω 为角速度 (rad/s)； η 为表观黏度 (Pa·s)。

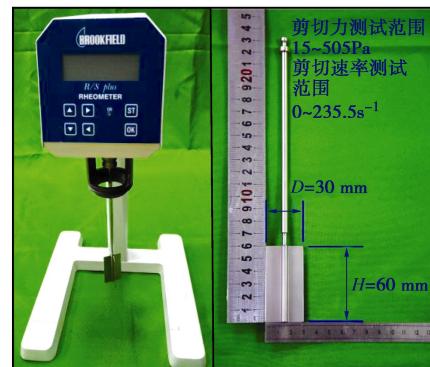


图 1 RST 流变仪及 V60-30 型桨式转子

Fig. 1 RST rheometer and V60-30 paddle rotor

1.2 试验土样

利用南海共享航次计划 (NORC2015-05)，采用重力式柱状取样法，试验土样取自南海北部陆坡区台湾浅滩陆坡 (东经 118°49.014'，北纬 21°50.010'，水深 1885 m)，取样深度为海底表层垂直向下至 2.4 m。该区域油气资源丰富，海洋地质灾害发育，具备海底滑坡形成的地形与自然条件^[18]，极具研究价值。

依据土工试验规程 (SL237—1999)，该土样为高液限黏土，天然状态为流塑态，物理力学性质指标见表 1。可知，作为在天然环境 (高压、低温) 下形成的结构性软黏土，其具有高灵敏度、高含水率、高液限等特点。采用 Hydro2000Mu 马尔文粒度仪得到土样的黏粒约占 34%，粉粒约占 55%，局部含有砂粒。基于 NOVA Nan450 型场发射扫描电镜，对原状样进行微观结构分析，分别放大 3000 与 10000 倍，如图 2 所示。土样中有明显的海洋生物残骸 (红圈)，虽孔隙率较高，但较大颗粒周围被片状黏粒包裹，呈现松散团粒状，聚结在一起，形成粒际作用^[9]，强度较高，

反映出该软黏土的特殊物理力学性质。

表1 试验土样的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of test soil samples

天然含水率/%	塑限/%	液限/%	塑限指数	液性指数
72.8~85.8	27.5	50.3	22.8	1.8~2.5
有机质含量/%	土粒相对密度	不排水强度/kPa	灵敏度	孔隙比
2.0	2.7	8.2~16.9	10.5~19.1	2.0~2.3

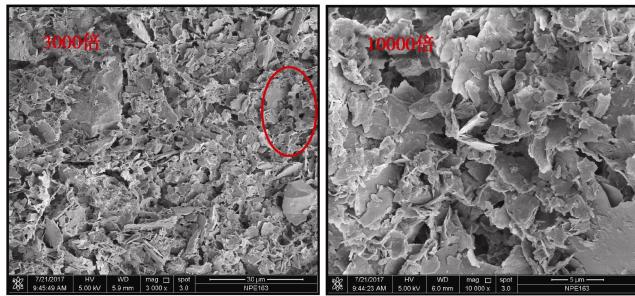


图2 原状土微观电镜扫描

Fig. 2 SEM images of undisturbed samples

从表1可看出, 在颗粒粒径、成分、形成环境等方面, 南海北部陆坡表层结构性软黏土重塑形成的海底泥流, 与以往研究的河口、水库、湖泊、海湾泥沙以及泥石流样本等^[7-10, 16]有显著差异。该海底泥流具备深海土层演化形成的真实性、特殊性以及代表性。

1.3 试验方案

Einsele^[19]认为海底沉积物的含水率大于液限时, 有流动的趋势。考虑到土样天然含水率与转子测试量程, 经过多次试测, 取泥流的含水率为90.0%~123.8%。另外, 海底管线直径一般在0.1~1.0 m, 海底泥流流速最大可以达到30 m/s^[20], 故剪切速率区间取为0~100 s⁻¹。

试验土样烘干后, 去除贝壳等杂质, 充分搅拌保证均匀性; 加水配制成3种含水率的土样, 见表2; 用搅拌枪匀速搅拌10 min, 放入模型筒中备用; 将土样振动密实排出气泡, 覆盖保鲜膜密封, 移入DW-40高精度低温恒温试验箱中, 静置3 h, 以便土样达到恒定的试验温度。土样在0.5℃, 4.5℃, 8℃, 12℃, 22℃制备完成后, 进行流变测试, 如图3所示。

具体步骤: 将模型筒取出, 利用TE-1310温度测试仪测试土样温度; 插入桨式转子后采用应变控制模式, 以0.2 s⁻¹的剪切速率增量^[16]测试500 s, 采集试验数据; 再次测定土样的温度, 最后取平均值。

表2 试验土样信息表

Table 2 Information of test soil samples

土样编号	含水率/%	密度/(kg·m ⁻³)
#1	90.0	1468
#2	100.2	1423
#3	123.8	1356

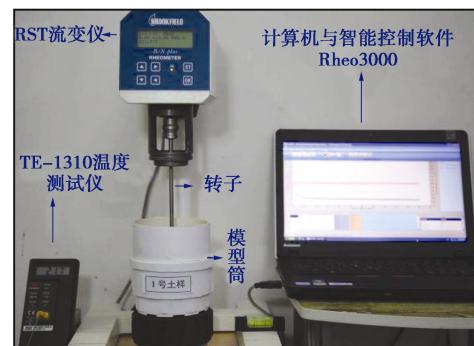


图3 流变试验测试图示

Fig. 3 Rheological tests

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

在5种温度环境下, 通过流变试验得到了15条海底泥流的流变曲线, 如图4所示。

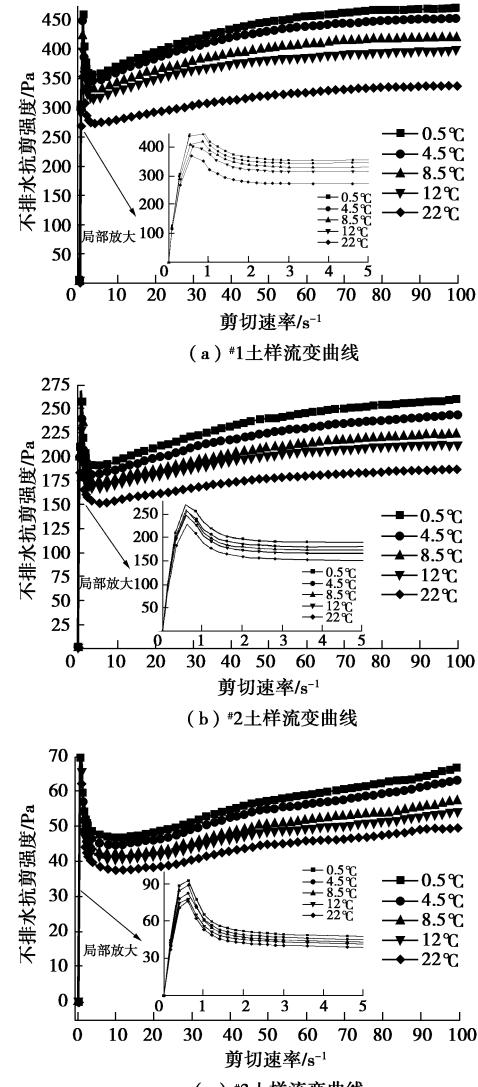


图4 海底泥流流变曲线

Fig. 4 Rheological curves of submarine mud flows

在 $0\sim100\text{ s}^{-1}$ 的剪切速率范围内, 根据试验实测点, 计算了 3 组土样在低温 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与室温 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的剪应力与表观黏度变化量, 将结果加权平均后得出: 低温条件下含水率为 90.0%, 100.2%, 123.8% 的 3 种海底泥流, 剪应力与表观黏度分别提高了 36.3%, 32.7%, 27.8%。还发现, 在 $0\sim100\text{ s}^{-1}$ 剪切速率范围内, 随着剪切速率的增加, 剪应力与表观黏度的差距将加大。

因此, 极其必要探究温度与含水率对泥流流变特性的影响机理, 并建立考虑低温与含水率的流变模型, 尤其是在泥流运动速度快、剪切速率大的极端工况。

2.2 流变曲线的变化规律

(1) 海底泥流相态转化

海底泥流作为一种非牛顿流体中黏塑性流体^[6], 其可承受一定的剪应力只发生变形而不产生流动。对比土样的测试结果, 均可将流变曲线分为 3 个阶段。以^{#2} (含水率为 100.2%) 海底泥流流变曲线为例进行分析, 如图 5 (图 4 (b) 的局部放大图) 所示。

a) 固态: 弹塑性变形阶段, 在极低剪切速率下, 剪应力随剪切速率先线性增长至 τ_1 , 然后再非线性增长至最大值 τ_2 , 海底泥流在该阶段先表现出弹性变形的特征, 后表现出塑性变形的特征, 属于固相特性。

b) 固液转化: 固液转化阶段, 在较低剪切速率下, 剪应力随剪切速率先线性降低至 τ_3 , 再非线性降低至极小值 τ_4 , 该阶段可认为固液相态并存阶段, 表现出兼具固体与流体的特性, 即为应变软化阶段。认为从 τ_2 开始出现流态并逐渐发展为完全流动行为。

c) 流态: 流态化阶段, 该阶段剪应力随剪切速率不断的增长, 为常规运动阶段。

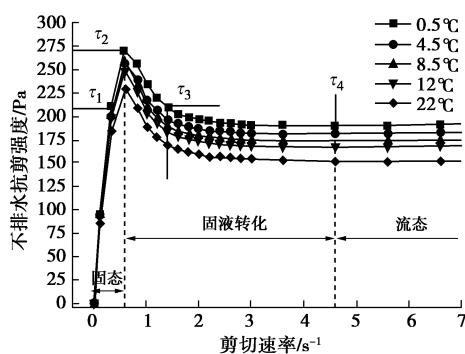


图 5 ^{#2} 海底泥流流变曲线局部放大图

Fig. 5 Enlargement of rheological curves of mud flow No. 2

(2) 加荷作用影响

值得注意的是, 流变试验应变控制模式明显地出现了上述 3 个阶段, 而前人研究的应力控制模式^[16]则没有明显的阶段性, 其原因主要与加载速率有关。应力控制模式为缓慢施加剪应力, 而应变控制模式为突然施加类似于冲击荷载的剪切力, 屈服应力的响应

定会增加, 与杨闻宇^[21]、王裕宜等^[22]研究的结果相似。另外, 对比图 4, 5 三种不同含水率土样 τ_2/τ_4 , 值不同 ($\tau_2/\tau_4=1.32<1.51<1.99$), 究其原因为土样对冲击荷载的抵抗能力不同。含水率越低, 则黏度越大, 强度越高, 抵抗能力越强。而同一含水率的土样随温度降低 τ_2/τ_4 值有变小趋势, 亦是温度降低, 黏度增大, 强度增高, 抵抗能力变强引起的。因此, 流变曲线在低剪切速率的反应规律, 应结合上述两种原因来理解。

2.3 流变机理分析

(1) 剪切稀化特征

非牛顿流体的黏度, 随着剪切速率的变化而变化, 可将其定义为表观黏度。表观黏度指在某一速度梯度下剪应力与剪切速率的比值, 如式 (3) 所示, 其反映泥流内部结构抵抗变形与阻碍流动的一种特性。由图 6 (a) 可知, 随着剪切速率的增加, 表观黏度迅速下降, 所有土样均表现出剪切稀化行为, 与前人的研究相同^[7-10, 15-16]。表观黏度与剪切速率在双对数坐标下, 可近似为线性增加, 见图 6 (c)。

由曲线还可验证 2.2 节流变曲线的变化规律。在单对数坐标轴下, 低剪切速率范围内, 表观黏度快速下降, 反弯点为固液转化起始点, 而后变化梯度逐渐放缓, 平直段为流态化阶段, 见图 6 (b)。易知, 含水率越低、温度越低, 剪切速率越小, 表观黏度越大。

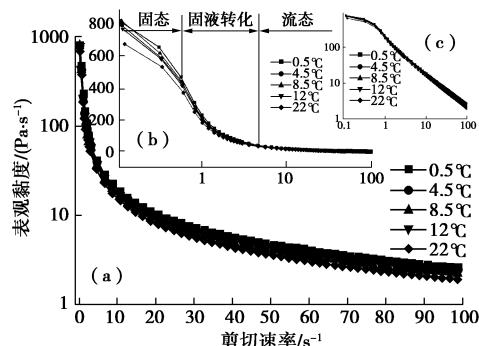


图 6 ^{#1} 泥流表观黏度与剪切速率关系

Fig. 6 Relationship between apparent viscosity and shear rate of mud flow No. 1

(2) 布朗运动

随着温度的降低, 3 组土样均出现了剪应力、表观黏度增大的现象, 如图 4~6 所示。众所周知, 作为典型的牛顿流体, 水的黏度随温度降低会快速增加 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 黏度提高 78.3%)。表观黏度反映了泥流抵抗变形和流动的能力, 随着温度降低, 布朗运动即各种粒子热运动将减弱, 泥流中固相颗粒与液体水分子的动能均会减少, 流动的阻力将会增大^[23], 即表现为惰性变得更强, 从而使海底泥流的流动变得更加困难, 表现出宏观的剪应力、表观黏度增大现象。

(3) 粒际作用

细颗粒与含有离子的水结合会形成絮团, 细颗粒含量稍高后, 絮团连结成絮网结构, 便有一定的承载能力。有研究表明^[24], 土颗粒粒径小于 0.03 μm 最易出现絮凝现象, 大于 0.05 μm 絯凝现象已非常微弱。对比图 4, 5 可知, 含水率不同, 海底泥流中自由水含量则不同, 土颗粒(尤其是黏粒、粉粒)间的距离也就不同, 所形成的絮网结构与进而形成缔合空间网的程度就有所差异。即含水率降低, 絯网结构与缔合空间网连接程度都将大大增加, 这就解释了含水率不同, 泥流剪应力与表观黏度差异的现象。不同含水率的泥流, 剪应力与表观黏度随温度变化的幅度不同, 亦是因缔合的空间网架不同, 对阻碍流动的程度不同, 同时网架对水分子的束缚能力也有差异, 进而造成表观黏度与剪应力增幅的差异。

3 海底泥流流变模型的建立

3.1 常用的流变模型

非牛顿流体的流变模式可见图 7^[15]。海底泥流常见的流变模型有剪切变稀流体的 Power-Low 模型, 黏塑性流体的 Bingham 模型与 Herschel-Bulkley 模型(其后称 H-B 模型)。其中 H-B 模型的表达式为

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n. \quad (4)$$

式中 τ_y 为屈服应力 (Pa); K 为稠度系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$); n 为流变指数, 当 $n=1$ 时为 Bingham 模型。

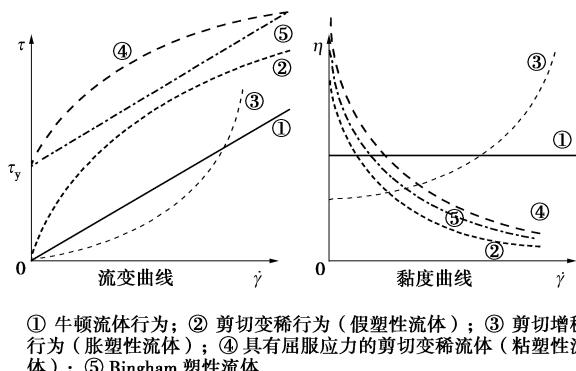


图 7 流变模式^[15]

Fig. 7 Rheological modes^[15]

3.2 流变模型拟合

由 2.3 节可知, 海底泥流属于具有剪切稀化特征的黏塑性流体, 故拟合选用经典三参数 H-B 模型^[7,25], 其可退化为两参数 Bingham 模型。考虑到研究对象为运动中的流态化滑坡体, 故不考虑低剪切速率下的固液转换^[25], 仅采用流态化阶段进行模型拟合与分析。因流变指数随温度变化极小, 首先将流变曲线经 H-B 模型拟合后, 得到流变指数; 对处于不同温度条件下

相同含水率土样的流变指数加权平均, 作为一个定值; 然后再次拟合流变曲线。所有土样的拟合结果见表 3。

表 3 流变曲线参数拟合

Table 3 Parameter fitting of rheological curves

编号	温度 /°C	屈服 应力 τ_y/Pa	稠度 系数 $K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	流变 指数 n	拟合度 R^2	拟合 区间 $\dot{\gamma}/\text{s}^{-1}$
		τ_y/Pa	$K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n		
1-1	0.5	264.112	60.998		0.981	4~100
1-2	4.5	262.938	56.218	0.275	0.983	4~100
1-3	8.5	260.998	47.078		0.982	4~100
1-4	12	255.140	42.330		0.985	4~100
2-1	0.5	137.068	28.646		0.992	4~100
2-2	4.5	134.106	25.436	0.320	0.993	4~100
2-3	8.5	133.609	21.070		0.987	4~100
2-4	12	131.012	19.272		0.988	4~100
3-1	0.5	43.133	0.599		0.986	4~100
3-2	4.5	41.276	0.563	0.794	0.985	4~100
3-3	8.5	39.191	0.464		0.975	4~100
3-4	12	38.083	0.412		0.977	4~100

3.3 流变参数定量分析

(1) 低温对流变参数的影响

将表 3 拟合的流变参数结合低温条件进行分析, 可清晰地看出: 随着温度降低, 稠度系数与屈服应力都呈线性增大趋势。据此, 建立低温条件与流变参数的关系, 得到了屈服应力变化规律见式 (5), 稠度系数变化规律见式 (6)。温度对稠度系数的影响相当明显, 稠度系数越大^[26], 表明泥流的表观黏度越大, 抵抗变形与流动的能力越强; 屈服应力越大, 泥流抵抗变形的能力亦越强, 二者均与试验结果相吻合。

$$\tau_y = At + B, \quad (5)$$

$$K = Ct + D. \quad (6)$$

式中 t 为温度 (°C); A 为屈服应力的温度调整系数 ($\text{Pa}/\text{°C}$); B 为 0°C 海底泥流的屈服应力 (Pa); C 为稠度系数的温度调整系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n/\text{°C}$); D 为 0°C 海底泥流的稠度系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)。参数 A , B , C , D 与泥流材料的组构有关, 参数拟合如表 4 所示。

表 4 低温条件与流变参数关系的拟合结果

Table 4 Fitting results between low temperatures and rheological parameters

土样	含水率 /%	A	B	R^2	C	D	R^2
#1	90.0	-0.740	265.511	0.853	-1.693	62.451	0.985
#2	100.2	-0.483	137.030	0.937	-0.847	29.002	0.985
#3	123.8	-0.449	43.280	0.992	-0.017	0.620	0.970

(2) 含水率对流变参数的影响

a) 流变指数

流变指数^[26]表示非牛顿流体的非线性程度。对于具有剪切稀化特征的非牛顿流体, 其取值范围通常为0~1.0, 数值越大表征泥流的非线性越强, 抵抗变形的能力越弱^[26]。流变指数不随温度变化, 由3.2节的拟合前提可知, 其与含水率的关系为

$$n = 0.014e^{3.26w} \quad (R^2 = 0.973) \quad . \quad (7)$$

式中, w 为含水率。

b) 屈服应力

将表4中考虑温度效应的屈服应力参数 A 、 B , 分别结合含水率分析, 拟合为

$$A = -0.45 - 1.16e^{-16.88w} \quad (R^2 = 0.970) \quad , \quad (8)$$

$$B = 29355e^{-5.28w} \quad (R^2 = 0.995) \quad . \quad (9)$$

其结果呈现指数变化规律。可知, 泥流的含水率越高, 其粒际作用越小, 屈服应力越低, 含水率的影响非常显著^[14, 23]。

c) 稠度系数

将表4中考虑温度效应的稠度系数参数 C 、 D 分别结合含水率分析, 拟合为

$$C = -762371e^{-14.12w} \quad (R^2 = 0.976) \quad , \quad (10)$$

$$D = -8.62 + 15448.49e^{-5.97w} \quad (R^2 = 0.992) \quad . \quad (11)$$

其规律亦呈指数变化。可知, 泥流的含水率越高, 泥流越稀, 稠度系数自然越低, 含水率影响仍相当明显^[23]。

3.4 综合流变模型

将式(7)~(11)归纳、整理后, 可得到考虑低温效应与含水率变化的海底泥流综合流变模型。首先将式(8)、(9)代入屈服应力计算公式(5), 得到

$$\tau_y = (-0.45 - 1.16e^{-16.88w})t + 29355e^{-5.28w} \quad . \quad (12)$$

再将式(10)、(11)代入稠度系数计算式(6), 得到

$$K = -762371e^{-14.12w}t + (-8.62 + 15448.49e^{-5.97w}) \quad . \quad (13)$$

最后将式(7)、(12)、(13)代入式(4), 得到综合流变模型:

$$\begin{aligned} \tau = & \left[(-0.45 - 1.16e^{-16.88w})t + 29355e^{-5.28w} \right] + \\ & \left[-762371e^{-14.12w}t + (-8.62 + 15448.49e^{-5.97w}) \right] \cdot \dot{\gamma}^{(0.014e^{3.26w})} \quad . \quad (14) \end{aligned}$$

使用该模型时, 首先根据海底泥流的含水率计算出H-B模型的流变指数, 然后基于式(14)结合目标温度, 得到模型的屈服应力与稠度系数, 进而建立起综合流变模型。需指出的是, 该海底泥流流变模型剪切速率的适用范围为4~100 s⁻¹; 温度取值为0.5°C~12°C; 含水率为90.0%~123.8%。

4 结 论

考虑真实海底温度环境, 基于RST流变仪, 探究了具有代表性的南海北部陆坡区3种不同含水率海底泥流的流变特性。得出以下3点结论。

(1) 采用RST流变仪的应变控制模式, 开展流变测试, 得出了温度与含水率变化条件下, 海底泥流的流变特性与变化规律, 以及海底泥流在低剪切速率下的相态转化过程。

(2) 与22°C室温相比, 0.5°C低温条件下海底泥流的剪应力与表观黏度显著增加, 且随着剪切速率增加进一步加大, 平均可提高35%以上; 通过布朗运动与粒际作用理论, 很好地解释了不同温度、含水率条件下海底泥流的流变特征及其变化机理。

(3) 引入H-B模型, 对海底泥流的流变参数进行深入探讨, 建立了考虑低温效应与含水率变化的海底泥流综合流变模型, 其可为低温环境海底泥流运动过程数值模拟与海底滑坡灾害预测提供支持。

参考文献:

- [1] MOSHER D C, MOSCARDELLI L, SHIPP R C, et al. Submarine mass movements and their consequences[J]. Advances in Natural & Technological Hazards Research, 2010, 41(3): 1~12.
- [2] 王立忠, 缪成章. 慢速滑动泥流对海底管道的作用力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 982~987. (WANG Li-zhong, MIAO Cheng-zhang. Pressure on submarine pipelines under slowly sliding mud flows[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 982~987. (in Chinese))
- [3] CANALS M, LASTRAS G, URGELES R, et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project[J]. Marine Geology, 2004, 213(1): 9~72.
- [4] 胡光海, 刘忠臣, 孙永福, 等. 海底斜坡土体失稳的研究进展[J]. 海岸工程, 2004, 23(1): 63~72. (HU Guang-hai, LIU Zhong-chen, SUN Yong-fu, et al. Advances in the research on sediment failure on submarine slope[J]. Coastal Engineering, 2004, 23(1): 63~72. (in Chinese))
- [5] 叶国良, 郭述军, 朱耀庭. 超软土的工程性质分析[J]. 中国港湾建设, 2010(5): 1~9. (YE Guo-liang, GUO Shu-jun, ZHU Yao-ting. Analysis of engineering properties of super soft soil[J]. China Harbor Construction, 2010(5): 1~9. (in Chinese))
- [6] BOUKPETI N, WHITE D J, RANDOLPH M F, et al. Strength of fine-grained soils at the solid-fluid transition[J].

- Géotechnique, 2012, **62**(3): 213 – 226.
- [7] BERLAMONT J, OCKENDEN M, TOORMAN E, et al. The characterisation of cohesive sediment properties[J]. Coastal Engineering, 1993, **21**(1/2/3): 105 – 128.
- [8] COUSSOT P, PIAU J M. On the behavior of fine mud suspensions[J]. Rheologica Acta, 1994, **33**(3): 175 – 184.
- [9] 王裕宜, 詹钱登, 严璧玉. 泥石流体的流变特性与运移特征[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2014. (WANG Yu-yi, ZHAN Qian-deng, YAN Bi-yu. Debris-flow rheology and movement[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2014. (in Chinese))
- [10] SI G. Experimental study of the rheology of fine-grained slurries and some numerical simulations of downslope slurry movements[D]. Oslo: University of Oslo, 2007.
- [11] ZAKERI A, HØEG K, NADIM F. Submarine debris flow impact on pipelines part I: experimental investigation[J]. Coastal Engineering, 2008, **55**(12): 1209 – 1218.
- [12] 李亚敏, 罗贤虎, 徐行, 等. 南海北部陆坡深水区的海底原位热流测量[J]. 地球物理学报, 2010, **53**(9): 2161 – 2170. (LI Ya-min, LUO Xian-hu, XU Xing, et al. Seafloor in-situ heat flow measurements in the deep-water area of the northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, **53**(9): 2161 – 2170. (in Chinese))
- [13] 邹大鹏, 卢博, 阎贫, 等. 南海北部海底沉积物在温度变化下的三种声速类型[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(3): 1017 – 1024. (ZOU Da-peng, LU Bo, YAN Pin, et al. Three types of sound velocity of seafloor sediments in the northern South China Sea under temperature variations[J]. Acta phys Sinica, 2012, **55**(3): 1017 – 1024. (in Chinese))
- [14] BARNES H A, NGUYEN Q D. Rotating vane rheometry: a review[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2001, **98**(1): 1 – 14.
- [15] SANTOLO A S D, PELLEGRINO A M, EVANGELISTA A. Experimental study on the rheological behaviour of debris flow[J]. Natural Hazards & Earth System Science, 2010, **10**(12): 2507 – 2514.
- [16] 鲁双, 范宁, 年廷凯, 等. 基于流变仪测试超软土强度的试验方法[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊1): 91 – 95. (LU Shuang, FAN Ning, NIAN Ting-kai, et al. Test method for testing strength of super soft soil based on rheometer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 91 – 95. (in Chinese))
- [17] BOUKPETY N, WHITE D J, RANDOLPH M F. Analytical modelling of the steady flow of a submarine slide and consequent loading on a pipeline[J]. Géotechnique, 2012, **62**(2): 137 – 146.
- [18] 寇养琦. 南海北部大陆边缘海底滑坡的初步研究[J]. 南海地质研究, 1993(5): 43 – 56. (KOU Yang-qi. Preliminary study on submarine landslide from northern continental of South China sea[J]. Geological Research of South China Sea, 1993(5): 43 – 56. (in Chinese))
- [19] EINSELE G. Deep-reaching liquefaction potential of marine slope sediments as a prerequisite for gravity mass flows? (Results from the DSDP)[J]. Marine Geology, 1990, **91**(4): 267 – 279.
- [20] 李宏伟, 王立忠, 国振, 等. 海底泥流冲击悬跨管道拖曳力系数分析[J]. 海洋工程, 2015, **33**(6): 10 – 19. (LI Hong-wei, WANG Li-zhong, GUO Zhen, et al. Drag force of submarine landslides mudflow impacting on a suspended pipeline[J]. Ocean Engineering, 2015, **33**(6): 10 – 19. (in Chinese))
- [21] 杨闻宇. 剪切载荷作用下高浓度黏性泥沙流变特性的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. (YANG Wen-yu. Experimental study on rheological behavior of high viscosity cohesive sediment under shear load[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese))
- [22] 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等. 黏性泥石流体的应力应变特性和流速参数的确定[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, **14**(1): 9 – 13. (WANG Yu-yi, ZHAN Qian-deng, HAN Wen-liang, et al. Viscous debris flow stress strain characteristics and velocity parameters of geological disasters and prevention of[J]. China Sinica, 2003, **14**(1): 9 – 13. (in Chinese))
- [23] DAVISON J M, CLARY S, SAASEN A, et al. Rheology of various drilling fluid systems under deepwater drilling conditions and the importance of accurate predictions of downhole fluid hydraulics[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, 1999.
- [24] 费祥俊, 康志成. 细颗粒浆体、泥石流浆体对泥石流运动的作用[J]. 山地学报, 1991, **9**(3): 143 – 152. (FEI Xiang-jun, KANG Zhi-cheng. Effects of fine-grained slurry and debris flow on debris flow movement[J]. Journal of the Mountain, 1991, **9**(3): 143 – 152. (in Chinese))
- [25] MAJOR J J, PIERSON T C. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries[J]. Water Resources Research, 1992, **28**(3): 841 – 857.
- [26] 陈育民, 高星, 刘汉龙. 砂土液化流动变形的简化方法[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1567 – 1573. (CHEN Yu-min, GAO Xing, LIU Han-long. Simplified method for flow deformation of sand liquefaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1567 – 1573. (in Chinese))