

文章编号:1672-3961(2024)06-0082-07

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.323

泥水盾构隧道用新型环保泥浆及流变性质

孙腾云¹,丁万涛^{2,3*},王承震¹,于文端¹,王志成¹,郭文静²

(1.中铁十四局集团有限公司,山东 济南 250014; 2.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002; 3.山东大学岩土与地下工程研究院,山东 济南 250061)

摘要:针对泥水盾构传统添加剂羧甲基纤维素钠(sodium carboxymethyl cellulose, CMC)降解困难这一问题,提出一种以亚麻籽胶(天然绿色植物胶)作为添加剂的环保泥浆。采用流变仪分析亚麻籽胶对膨润土泥浆流变曲线的影响,研究不同亚麻籽胶质量分数下屈服应力和表观黏度的变化规律,并与 CMC 和现有环保添加剂瓜尔胶的效果进行对比,揭示各添加剂在泥浆中的作用机理。结果表明,上述3种添加剂均可以提高泥浆的流变性质,各泥浆的流体动力学行为可用 Herschel-Bulkley 模型较好地描述,且表观黏度 μ 、屈服应力 τ_0 、稠度系数 k 与添加剂质量分数 C 呈正相关,而流变指数 n 与质量分数 C 呈负相关。当添加剂质量分数一定时,亚麻籽胶对膨润土泥浆流变性质的提高效果与 CMC 相近并高于瓜尔胶,可代替二者作为环保泥浆的添加剂。

关键词:泥水盾构;泥浆;亚麻籽胶;流变性质;作用机理**中图分类号:**U45 **文献标志码:**A**引用格式:**孙腾云,丁万涛,王承震,等. 泥水盾构隧道用新型环保泥浆及流变性质[J]. 山东大学学报(工学版),2024,54(6):82-88.

SUN Tengyun, DING Wantao, WANG Chengzhen, et al. Environmentally friendly slurry and rheological properties for slurry shield tunnel [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(6):82-88.

Environmentally friendly slurry and rheological properties for slurry shield tunnel

SUN Tengyun¹, DING Wantao^{2,3*}, WANG Chengzhen¹, YU Wenduan¹, WANG Zhicheng¹, GUO Wenjing²

(1. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 3. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In order to solve the difficult degradation problem of traditional additive sodium carboxymethyl cellulose (CMC) for slurry shields, an environmental friendly slurry with flaxseed gum (natural green vegetable gum) as an additive was proposed. The effect of flaxseed gum on the rheological curve of bentonite slurry was analyzed by rheometer. The variation of yield stress and apparent viscosity under different flaxseed gum content was studied. The effect of CMC and existing green additive guar gum was compared. The mechanism of different additives in slurry was also clarified. The results showed that the three additives could improve the rheological properties of the slurry. The hydrodynamic behavior was well described by Herschel-Bulkley model. The apparent viscosity μ , yield stress τ_0 and consistency coefficient k were positively correlated with the additive content C , while the rheological index n was negatively correlated with the content C . When the additive content was constant, the effect of flaxseed gum on the rheological properties of bentonite slurry was similar to CMC and higher than guar gum, which could replace the two as additives for environmental friendly slurry.

Keywords: slurry shield; slurry; flaxseed gum; rheological property; action mechanism**收稿日期:**2023-12-16**基金项目:**国家自然科学基金面上资助项目(52278403);山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME135)**第一作者简介:**孙腾云(1988—),男,山东潍坊人,工程师,主要研究方向为隧道与地下工程施工管理与技术。E-mail:1033267154@qq.com***通信作者简介:**丁万涛(1975—),男,山东济南人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为盾构隧道稳定性。

E-mail:wantaod@sdu.edu.cn

0 引言

泥水盾构法因具有地层适应性强、安全稳定等优点已广泛应用于隧道施工中^[1]。隧道开挖时,性质(如密度、流变性质和滤失量等)良好的加压泥浆能够向地层中渗透,并在开挖表面处形成一层低渗透性的泥膜,这层泥膜可以将泥浆压力转移到土骨架上,从而保证开挖面的稳定^[2-3]。用于泥水盾构的泥浆一般由水和钠基膨润土组成,在某些情况下可以加入添加剂提高和改善泥浆的性能^[4]。目前,工程中常用的添加剂主要是羧甲基纤维素钠(sodium carboxymethyl cellulose, CMC)和聚阴离子纤维素(polyanionic cellulose, PAC)。然而,CMC和PAC作为传统制浆材料很难降解,随着废浆排出易对周围的水土环境造成严重污染^[5]。针对上述问题,一些学者开始研究天然可降解添加剂在盾构泥浆中的应用。文献[6]以淀粉、黏土、 Na_2CO_3 和淡水作为原材料,研发了在复杂应力作用下力学性能良好且成膜时间短的绿色泥浆。在此基础上,文献[7]使用预胶化淀粉改变泥浆的性质,并通过室内砂柱试验分析了泥浆在地层中的渗透和成膜规律;文献[8]研究了黄原胶和瓜尔胶两种添加剂对泥浆渗透性能的影响,验证了这种绿色泥浆作为盾构泥浆材料的可能性;文献[9]针对海底泥水盾构隧道工程,提出一种适用于海水施工环境的绿色抗盐泥浆;文献[10]选择白糊精作为绿色泥浆的添加剂,通过试验发现该泥浆具有卓越的降滤失及成膜能力。以上研究表明环保添加剂可以改变泥浆的密度、漏斗黏度等性质,有利于泥浆在地层中渗透并形成泥膜。

泥浆在地层中的渗透行为本质上是流体在压力作用下的变形与流动,因此,明确泥浆的流变性质对于研究泥浆渗透行为、建立泥浆渗透理论模型和数值模型具有重要意义^[11-12]。文献[13]研究了添加剂和温度对膨润土基钻井液流动行为的影响,指出含CMC的膨润土悬浮液表现出假塑性流变特征;文献[14]提出PAC可以提高膨润土悬浮液的表现黏度和流体性能;文献[15-16]发现海水显著降低了泥浆的屈服应力和表现黏度,加入CMC、PAC可以缓解流变性质的劣化,并分析了CMC和PAC在海水泥浆中的作用机理;文献[17]得出黄原胶可以提高泥浆表现黏度等流变性质的结论。以上研究表明膨润土泥浆流变性质深受添加剂及其质量

分数的影响,然而,关于环保添加剂的流变增强机理仍较少涉及。此外,尽管黄原胶可以有效提高泥浆的流变性质,但其作为由细菌发酵的多糖,制作工艺复杂,我国对黄原胶的生产研究起步较晚,产量难以满足市场需求,进口量约占40%^[18]。因此,选择新型的环保添加剂并探索泥浆流变性质和流变增强机理刻不容缓。亚麻籽胶是从亚麻籽壳中提取的一种亲水胶体,具有良好的增稠作用且天然无污染^[19],目前我国亚麻资源非常丰富,但亚麻籽中所含的亚麻籽胶一直被作为饲料或废弃物,故研究亚麻籽胶作为盾构泥浆添加剂的可行性对改善泥浆流变性质、减少污染、提高亚麻利用率意义显著。

本研究基于一系列室内试验,选择亚麻籽胶这一多功能植物胶作为添加剂并制备新型环保泥浆,同时以CMC和瓜尔胶作为对比材料,研究了各添加剂及其质量分数对钠基膨润土泥浆流变性质的影响,采用Herschel-Bulkley模型对流变曲线进行了拟合,建立了泥浆屈服应力、表现黏度与添加剂质量分数间的数学模型,此外,对比分析了亚麻籽胶与其他2种添加剂的流变增强效果,并揭示了添加剂在膨润土泥浆中的作用机理。研究结果可为泥水盾构隧道用环保泥浆的研发提供一定的试验数据支撑。

1 材料与方法

1.1 泥浆材料

本试验泥浆材料包括淡水、钠基膨润土和添加剂。所用钠基膨润土主要由钠基蒙脱石、伊利石-高岭石、斜长石和石英组成,其膨胀指数为15.9 mL/(2 g),pH为7.2。钠基膨润土的化学成分见表1。

表1 钠基膨润土的化学成分

化学成分	SiO_2	Al_2O_3	MgO	其他金属氧化物	烧失量
质量分数/%	69.20	12.40	5.31	5.74	7.35

所用添加剂为亚麻籽胶、CMC和瓜尔胶。亚麻籽胶是一种天然新型多功能植物胶,具有较强的膨润性、增稠性且绿色无污染,目前主要应用于食品、医药业,其在盾构、钻井领域中的应用较少^[20];CMC是一种阴离子型高分子化合物,具有良好的增稠性及乳化稳定性等,已广泛应用于盾构泥浆及钻井液等的制备^[21];瓜尔胶属于天然植物胶,是食品、石油等行业较为常用的天然增稠剂^[22]。

1.2 试验仪器

流变试验所用仪器由美国 Brookfield 触屏流变仪、温度控制系统、数据采集与处理系统组成。其中,流变仪选择同心轴圆柱体转子,以适用于浆体的流变测量;温度控制系统能够保证试验时泥浆外部温度恒定,其控制温度最低为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,本试验温度环境设置为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;数据采集与处理系统包括电脑和 Rheo 3000 analysis software 软件,可实时记录试验过程中剪切应力、剪切速率及表观黏度等参数的变化。泥浆密度和漏斗黏度分别采用比重计和漏斗黏度计测量。

1.3 试验方法

1.3.1 泥浆制备

本试验基浆由钠基膨润土和淡水组成,其质量比固定为 $14:86$,该质量比为泥水盾构隧道常用的泥浆材料配比。基浆中添加剂的质量分数分别为 0 、 0.1% 、 0.2% 及 0.3% 。制备泥浆时,首先称取一定质量淡水置于干净的烧杯中,将钠基膨润土、添加剂边搅拌边加入,并用玻璃棒混合均匀得到待测泥浆样品。

1.3.2 流变性质测试步骤

具体步骤如下:(1)采用搅拌机将待测样品于 750 r/min 下搅拌 30 min ,然后使用保鲜膜将烧杯密封以避免空气中杂质污染泥浆,静置 24 h 使泥浆充分膨化;(2)用玻璃棒将待测样品搅拌 30 s ,然后倒入流变仪内筒中;(3)流变性质测试程序为剪切速率下降模式(1000 s^{-1} 至 0 ,持续 3 min)^[23];(4)一组试验结束后,清洗内筒和转子,进行下一组试验。

2 结果与分析

2.1 亚麻籽胶质量分数对膨润土泥浆流变性质的影响

不同亚麻籽胶质量分数下膨润土泥浆流变曲线如图1所示。图1(a)表明,随着剪切速率逐渐增大,泥浆的剪切应力呈现不断增大的趋势;剪切速率一定时,亚麻籽胶质量分数越大,泥浆的剪切应力越大。图1(b)描述了膨润土泥浆表观黏度随剪切速率变化的曲线,泥浆表观黏度随剪切速率增加先迅速减小后逐渐趋于稳定,称为泥浆的剪切变稀性质,该性质可以使泥浆具备卓越的运输及携渣能力,避免表观黏度过大堵塞泥浆运输管道。此外,亚麻籽胶的添加对泥浆的表观黏度也有显著影响,其质量分数增加有利于提高膨润土

泥浆的黏度。

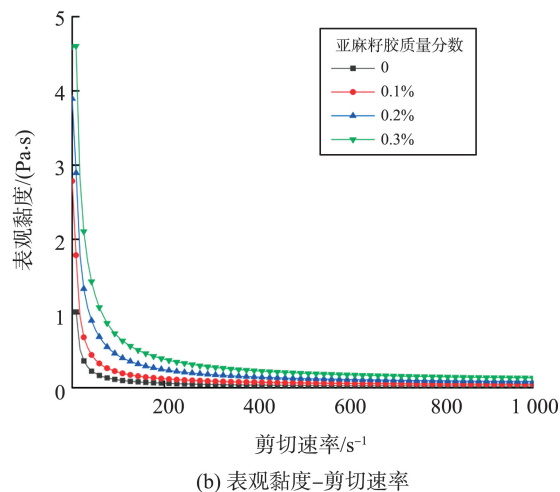
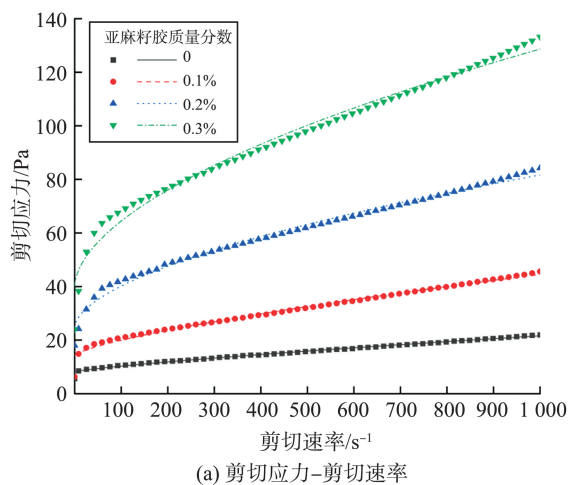


图1 不同亚麻籽胶质量分数下膨润土泥浆流变曲线
Fig.1 Rheological curves of bentonite slurry under different flaxseed gum mass fractions

采用 Herschel-Bulkley 模型对图1(a)中的流变数据进行拟合,拟合公式为:

$$\{\tau\} = \{\tau_0\} + k \cdot \{\gamma\}^n, \quad (1)$$

式中: $\{\tau\}$ 为单位为 Pa 的剪切应力 τ 的数值; $\{\gamma\}$ 为单位为 s^{-1} 的剪切速率 γ 的数值, s^{-1} ; $\{\tau_0\}$ 为单位为 Pa 的屈服应力 τ_0 的数值; k 为稠度系数; n 为流变指数。

选择相关系数 R^2 作为评价模型拟合效果的指标,结果如表2所示。由表2可知,各种亚麻籽胶质量分数下,模型相关系数均趋近于1,这说明 Herschel-Bulkley 模型能够准确地描述膨润土泥浆的流体动力学行为。此外,亚麻籽胶的添加量对泥浆的流变参数具有显著的影响,当亚麻籽胶质量分数增加时,泥浆的屈服应力 τ_0 和稠度系数 k 逐渐增大,而流变指数 n 表现出逐渐减小的趋势。各组泥浆的流变指数均小于1,意味着泥浆具有剪切变稀行为,这与图1(b)中表观黏度随剪切速率增加而逐

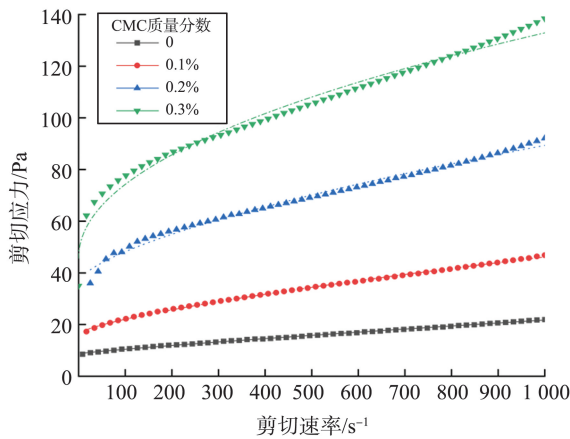
渐减小的现象一致。

表 2 不同亚麻籽胶质量分数下泥浆流变方程及相关系数
Table 2 Rheological equation and correlation coefficient of mud at different flaxseed gum mass fractions

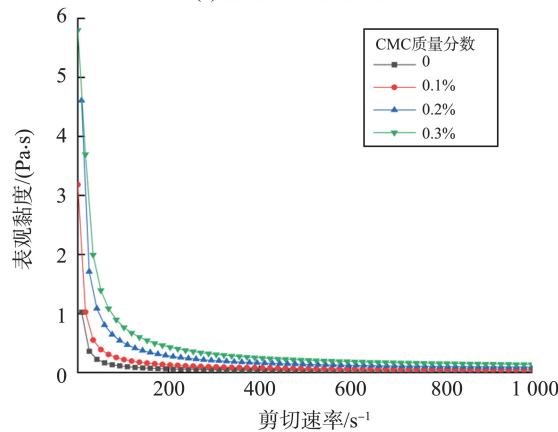
质量分数/%	流变方程	R ²
0	$\tau = 7.34 + 0.03\gamma^{0.88}$	0.998
0.1	$\tau = 14.28 + 0.20\gamma^{0.73}$	0.988
0.2	$\tau = 23.58 + 1.50\gamma^{0.53}$	0.982
0.3	$\tau = 41.98 + 1.73\gamma^{0.51}$	0.977

2.2 CMC 质量分数对膨润土泥浆流变性质的影响

不同 CMC 质量分数下膨润土泥浆曲线如图 2 所示。由图 2 可知,各组泥浆的剪切应力和剪切速率都呈正相关,且 CMC 的添加提高了泥浆的剪切应力,当 CMC 质量分数为 0.3% 时,其对泥浆剪切应力的提高效果略高于同质量分数时的亚麻籽胶。此外,不同 CMC 质量分数下,泥浆均表现出了非牛顿流体行为,当剪切速率增大时表观黏度逐渐下降,有利于泥浆在管道中运输。



(a) 剪切应力-剪切速率



(b) 表观黏度-剪切速率

图 2 不同 CMC 质量分数下膨润土泥浆流变曲线

Fig.2 Rheological curves of bentonite slurry at different CMC mass fractions

不同 CMC 质量分数下膨润土泥浆的流变数据拟合结果如表 3 所示,其流体动力学行为可以用

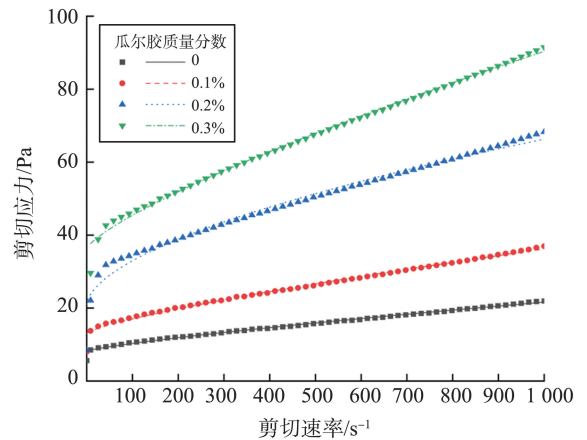
Herschel-Bulkley 模型表征。随着 CMC 质量分数的增加,泥浆的屈服应力 τ_0 和稠度系数 k 显著提高,说明泥浆在地层中流动时将会受到更大的阻力,有利于泥膜形成。流变指数随 CMC 质量分数增加逐渐减小,非牛顿流体特征愈加明显。

表 3 不同 CMC 质量分数下泥浆流变方程及相关系数
Table 3 Rheological equation and correlation coefficient of mud at different flaxseed gum CMC mass fractions

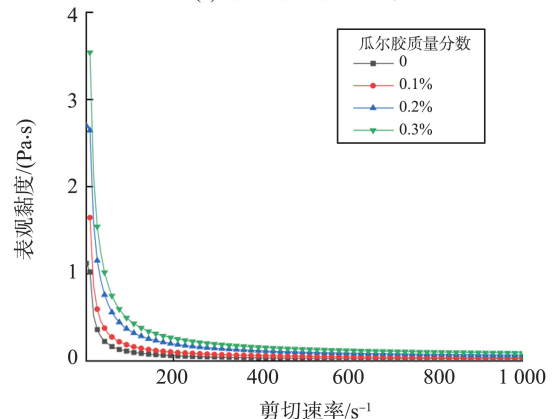
质量分数/%	流变方程	R ²
0	$\tau = 7.34 + 0.03\gamma^{0.88}$	0.998
0.1	$\tau = 17.01 + 1.90\gamma^{0.63}$	0.983
0.2	$\tau = 28.68 + 2.19\gamma^{0.48}$	0.980
0.3	$\tau = 45.59 + 2.44\gamma^{0.45}$	0.976

2.3 瓜尔胶质量分数对膨润土泥浆流变性质的影响

瓜尔胶质量分数对膨润土泥浆流变性质影响规律如图 3 所示。由图 3 可知,各组泥浆的剪切应力与剪切速率、剪切应力与瓜尔胶质量分数均呈正相关,而表观黏度则随剪切速率增大逐渐变小,说明含瓜尔胶泥浆也存在剪切变稀现象。此外,当瓜尔胶质量分数变大时,泥浆的表观黏度也随之增大。



(a) 剪切应力-剪切速率



(b) 表观黏度-剪切速率

图 3 不同瓜尔胶质量分数下膨润土泥浆流变曲线

Fig.3 Rheological curves of bentonite slurry under different guar gum mass fractions

采用 Herschel-Bulkley 模型对不同瓜尔胶质量分数下膨润土泥浆的流变曲线进行拟合,结果如表 4 所示。由表 4 可知,各组泥浆的流变数据拟合后相关系数均较高,Herschel-Bulkley 模型能够较好地描述瓜尔胶泥浆的流体行为。与不含添加剂的纯膨润土泥浆相比,含瓜尔胶泥浆的屈服应力、稠度系数显著增大,流变指数明显减小。

表 4 不同瓜尔胶质量分数下泥浆流变方程及相关系数
Table 4 Rheological equation and correlation coefficient of mud at different guar gum mass fractions

质量分数/%	流变方程	R^2
0	$\tau = 7.34 + 0.03\gamma^{0.88}$	0.998
0.1	$\tau = 13.05 + 0.12\gamma^{0.77}$	0.992
0.2	$\tau = 20.89 + 0.85\gamma^{0.58}$	0.980
0.3	$\tau = 36.34 + 1.27\gamma^{0.53}$	0.989

2.4 流变性质增强效果对比分析

屈服应力和表观黏度是分析泥浆流变行为的重要指标,为了更加直观地对比各添加剂的增强效果,本节获取了不同添加剂质量分数下的屈服应力和表观黏度,以便对比分析并验证亚麻籽胶作为新型环保泥浆添加剂的可行性。各组泥浆屈服应力与添加剂质量分数之间的关系如图 4 所示。

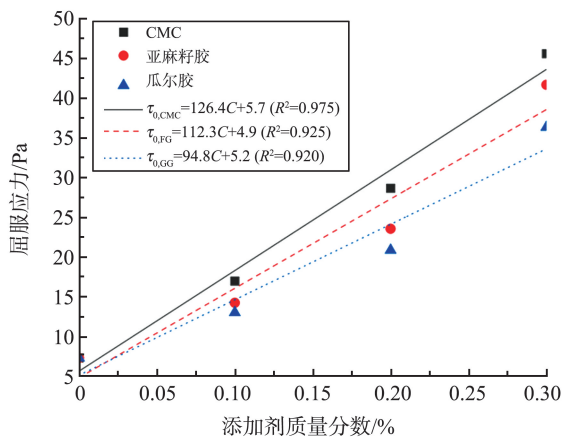


图 4 屈服应力与添加剂质量分数的关系

Fig.4 Relationship between yield stress and additive mass fractions

采用线性函数拟合试验数据,相关系数 R^2 趋近于 1,这说明线性函数可以准确描述泥浆的屈服应力随添加剂质量分数变化情况。由图 4 可知,泥浆的屈服应力随添加剂质量分数增加呈线性增大趋势,亚麻籽胶、CMC 及瓜尔胶添加剂泥浆的屈服应力表达式分别为:

$$\tau_{0,FG} = 112.3C + 4.9, \quad (2)$$

$$\tau_{0,CMC} = 126.4C + 5.7, \quad (3)$$

$$\tau_{0,GG} = 94.8C + 5.2, \quad (4)$$

式中: $\tau_{0,FG}$ 、 $\tau_{0,CMC}$ 、 $\tau_{0,GG}$ 分别为含亚麻籽胶、CMC、

瓜尔胶泥浆的屈服应力, Pa; C 为添加剂质量分数, %。

当质量分数一定时,不同添加剂对泥浆的屈服应力提高能力从大到小依次为 CMC、亚麻籽胶、瓜尔胶。

当剪切速率为 1000 s^{-1} 时表观黏度趋于稳定,故选择此时各组泥浆的表观黏度进行对比分析,结果如图 5 所示。

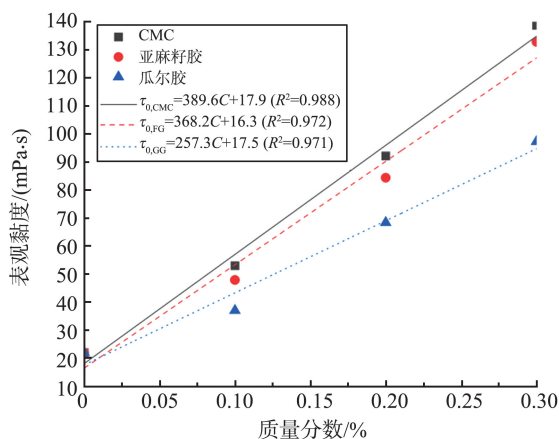


图 5 表观黏度与添加剂质量分数的关系

Fig.5 Relationship between apparent viscosity and additive mass fractions

同样采用线性函数拟合试验数据,结果较为理想,这意味着膨润土泥浆的表观黏度随各添加剂质量分数的增加而线性增长,亚麻籽胶、CMC 及瓜尔胶添加剂泥浆的表观黏度表达式分别为:

$$\mu_{FG} = 368.2C + 16.3, \quad (5)$$

$$\mu_{CMC} = 389.6C + 17.9, \quad (6)$$

$$\mu_{GG} = 257.3C + 17.5, \quad (7)$$

式中: μ_{FG} 、 μ_{CMC} 、 μ_{GG} 分别为含亚麻籽胶、CMC、瓜尔胶泥浆的表观黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; C 为添加剂质量分数, %。

当添加剂质量分数一定时,亚麻籽胶的增黏能力接近于 CMC,高于瓜尔胶。含 0.3% 亚麻籽胶的新型环保泥浆的表观黏度为 $132.8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,与相同质量分数下含 CMC 泥浆表观黏度 ($138.7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) 相近,这表明亚麻籽胶可以代替传统添加剂 CMC,使泥浆具备较高的表观黏度,有利于形成优质的泥膜,从而保证掌心面稳定性。

3 流变性质增强作用机理

添加剂在泥浆中的作用机理如图 6 所示。当钠基膨润土与淡水混合时,钠基膨润土分子的硅氧基 (Si-O) 与水分子结合形成硅醇 (Si-OH),从而在膨

润土颗粒周围形成一层水化膜。加入亚麻籽胶后,亚麻籽胶分子上的羟基(-OH)可以和Si-OH结合形成分子内氢键(Si-O-H-O),从而提高膨润土颗粒的膨胀能力,使水化膜变厚,颗粒间空隙减小,自由水流动受阻^[24],随着更多的亚麻籽胶加入,其与膨润土颗粒的分子间相互作用加强,泥浆逐渐形成致密、连续的结构,表观黏度和屈服应力迅速增加,

泥浆流变性质得到提高。另一方面,亚麻籽胶属于阴离子多糖,其分子主链上含有带负电的半乳糖醛酸基团,不仅能够吸附携带正电荷的钠基膨润土颗粒,还可以使亚麻籽胶分子链在静电排斥作用下充分伸展和缠绕,使其具有较大的流体动力学半径,从而增强泥浆的流动阻力和悬浮颗粒能力,提高泥浆的流变性质^[19]。

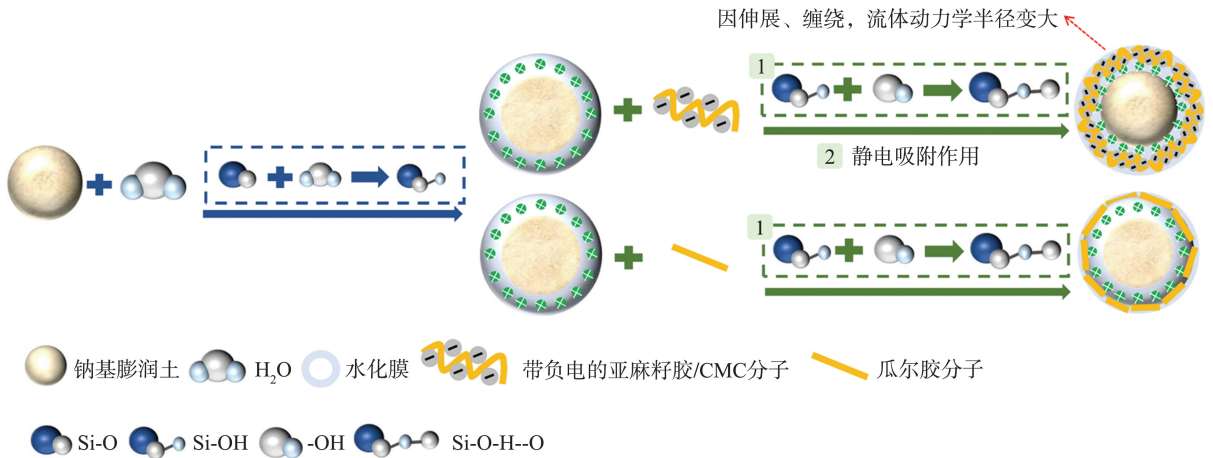


图6 添加剂在泥浆中的作用机理图
Fig.6 Mechanism diagram of additives in slurry

CMC作为一种带负电荷的高分子聚合物,在膨润土泥浆中也具有上述和亚麻籽胶相似的作用机理。对于瓜尔胶,其分子上的羟基也可以与钠基膨润土的Si-OH结合形成分子内氢键(Si-O-H-O),从而改善泥浆的表观黏度等流变性质,但瓜尔胶属于非离子多糖,分子链不含有负电基团,因此无法通过静电作用吸附更多的膨润土颗粒,流体动力学半径也相对较小,所以瓜尔胶对泥浆流变性质的增强能力不如亚麻籽胶和CMC。

别达到41.98 Pa和132.8 mPa·s,有利于形成致密的泥膜,可以代替传统制浆材料CMC和现有绿色制浆材料瓜尔胶作为新型环保泥浆的添加剂,减少对生态环境的污染。

(3)揭示了添加剂在泥浆中的作用机理。亚麻籽胶、CMC及瓜尔胶分子能够与膨润土颗粒相互作用形成氢键,增强了膨润土的膨胀性,从而提高泥浆的流变性质。此外,CMC和亚麻籽胶分子链的负电性使其能够充分伸展,因而二者的流变增强效果优于瓜尔胶。

4 结论

本研究提出一种新型环保泥浆,该泥浆以亚麻籽胶作为添加剂,并基于一系列试验研究了亚麻籽胶、CMC及瓜尔胶对泥浆流变性质的影响规律,阐明了不同添加剂在膨润土泥浆中的作用机理,主要结论如下。

(1)亚麻籽胶、CMC和瓜尔胶均可以提高膨润土泥浆的流变性质,泥浆的流动模型可以用Herschel-Bulkley模型描述,添加剂的加入使泥浆表现出更明显的剪切变稀特性。

(2)亚麻籽胶对屈服应力、表观黏度的提升能力与CMC相当,显著高于瓜尔胶。质量分数为0.3%的亚麻籽胶使泥浆的屈服应力和表观黏度分

参考文献:

[1] AMANULLAH M, RAMASAMY J, AL-ARFAJ M K, et al. Application of an indigenous eco-friendly raw material as fluid loss additive[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 139:191-197.
[2] 陈健, 苏秀婷, 黄习习, 等. 大直径泥水盾构穿越敏感环境变形控制材料研发及控制参数研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4):256-264.
CHEN Jian, SU Xiuting, HUANG Xixi, et al. The development of deformation control materials for a large-diameter slurry shield passing through the sensitive environment and research on related control parameters [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 256-264.
[3] 王超, 朱伟, 闵凡路, 等. 压气条件下泥膜进气值测量

- 试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 626-632.
- WANG Chao, ZHU Wei, MIN Fanlu, et al. Measuring test for air-entry value of filter cake under air pressure[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 626-632.
- [4] 刘邦, 吴智, 周涛, 等. 断层破碎带泥水盾构绿色泥浆试验研究[J]. 江西理工大学学报, 2021, 42(1): 7-12.
- LIU Bang, WU Zhi, ZHOU Tao, et al. Experimental study on environment-friendly slurry for slurry shield in fault fracture zone[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2021, 42(1): 7-12.
- [5] CUI W, LIU D, SONG H, et al. Development and experimental study on environmental slurry for slurry shield tunneling[J]. Construction and Building Materials, 2019, 216: 415-423.
- [6] 张子新, 胡欣雨, 黄昕. 一类特殊的泥水盾构掘进绿色泥浆实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 1574-1578.
- ZHANG Zixin, HU Xinyu, HUANG Xin. Experimental study on environment friendly slurry for slurry shield tunneling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(11): 1574-1578.
- [7] 王廷. 强渗透地层泥水盾构绿色泥浆配制及其适应性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- WANG Ting. A study on preparation of environment friendly slurry and its adaptation during slurry shield tunnelling in high permeability stratum[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] 王森. 泥水盾构绿色泥浆配制及其对开挖面土体性质影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- WANG Sen. Study on preparation of environment-friendly slurry and its influence on ground strength during slurry shield tunneling in sand [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [9] 黄小龙. 海底隧道泥水盾构绿色抗盐泥浆配制及其适应性研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- HUANG Xiaolong. Study on preparation and stratum adaptation of green anti-salt slurry for submarine tunnel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [10] 张称呈. 一种新型泥水盾构绿色泥浆配制及其性能研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(7): 57-61.
- ZHANG Chengcheng. Preparation of an environmental friendly slurry for slurry shield and its performance research[J]. Construction Technology, 2022, 51(7): 57-61.
- [11] 翟楠楠, 王伟山, 郑柏存. 泥水盾构用泥浆浆液的流变性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊1): 58-64.
- ZHAI Nannan, WANG Weishan, ZHENG Baicun. Rheological properties of slurry slurry for slurry shield [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Suppl.1): 58-64.
- [12] XU T, BEZUIJEN A. Experimental study on the mechanisms of bentonite slurry penetration in front of a slurry TBM [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93: 103052.
- [13] SINGH P K, SHARMA V P, CAEN R, et al. The effect of additives and temperature on the flow behavior of sodium bentonite suspensions [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1992, 6: 349-355.
- [14] YANG P, LI T B, WU M H, et al. Analysis of the effect of polyanionic cellulose on viscosity and filtrate volume in drilling fluid [J]. Materials Research Innovations, 2015, 19: 12-16.
- [15] WANG Z, DING W, ZHU Z, et al. Experimental study on rheological behaviors of Na-bentonite slurries under seawater intrusion [J]. Construction and Building Materials, 2022, 357: 129369.
- [16] WANG Z, GUO W, QIN W, et al. Influences of polyanionic celluloses and temperature on the rheological property of seawater slurries [J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128964.
- [17] BENYOUNES K, BENMOUNAH A. Rheological and electrokinetic characterization of bentonite particles in aqueous phase in presence of KCl [J]. Particulate Science and Technology, 2015: 39-44.
- [18] 杜风光, 陈伟红, 闫德冉, 等. 我国黄原胶生产的现状、存在的问题及对策 [J]. 食品科学, 2001(10): 97-99.
- DU Fengguang, CHEN Weihong, YAN Deran, et al. The present situation, existing problems and countermeasures of xanthan gum production in China [J]. Food Science, 2001(10): 97-99.
- [19] 陈海华. 亚麻籽胶的功能性质、结构及其应用 [D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- CHEN Haihua. Functional properties, structure and application of flaxseed gum [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2005.
- [20] 禹晓, 黄沙沙, 聂成镇, 等. 亚麻籽胶结构及功能应用研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(1): 212-217.
- YU Xiao, HUANG Shasha, NIE Chengzhen, et al. Research progress of the structure and functional application of flaxseed gum [J]. Food Research and Development, 2020, 41(1): 212-217.
- [21] 李静, 杜柏桥, 黄龙, 等. 羧甲基纤维素钠溶液的流变性质及其在酸性乳饮料中的应用 [J]. 食品科学, 2007, 28(11): 56-59.
- LI Jing, DU Baiqiao, HUANG Long, et al. Rheological properties of CMC aqueous solution and its application in stabilization on acidified milk drinks [J]. Food Science, 2007, 28(11): 56-59.