

盾构触变泥浆不同体系的性能与机理研究

袁 镇

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200000)

摘 要: 为满足复杂地层条件下盾构及顶管施工对支护与润滑材料性能的适配要求,以钠基膨润土为基础A液,选用水玻璃和高分子两类B液构建双液型触变泥浆体系,旨在系统探讨不同体系与配比对泥浆宏观性能与结构特征的影响规律。通过比重、黏度、静压滤失量、压缩-回弹性能及抗剪强度等指标测试,系统评估了两类材料体系的差异。结果表明:在常用配比条件下,水玻璃体系的比重、黏度及抗剪强度均高于高分子体系,体现出其较强的无机凝胶化与结构致密特征;高分子体系在滤失量与压缩-回弹性能方面表现更优,具备良好的变形恢复与保水能力。此外,随着泥水比的增加,两类体系的比重、黏度、滤失量及抗剪强度均呈上升趋势,但水玻璃体系的压缩与回弹性能略有下降,而高分子体系回弹性能显著提升,表明泥水比变化调控了颗粒间相互作用与网络结构的致密程度,也反映出无机凝胶与有机聚合物体系在应变恢复机理上的本质差异。研究揭示了双液型触变泥浆在不同体系与配比条件下的性能演化规律,为盾构及顶管施工中高性能、可调控、绿色支护与润滑材料的优化设计提供了理论依据与技术支撑。

关键词: 隧道盾构;触变泥浆;膨润土;水玻璃;高分子;反应机理

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0038-06

Study on Performance and Mechanism of Different Systems of Thixotropic Slurry for Shield Tunneling

YUAN Zhen

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: To meet the performance adaptation requirements of support and lubrication materials for shield tunneling and pipe jacking under the complex ground conditions, based on sodium-based bentonite as the A liquid, two types of B liquids, namely sodium silicate and polymer, are selected to construct a two-fluid thixotropic slurry system, which aims to systematically explore the influence laws of different systems and ratios on the macroscopic properties and structural characteristics of slurry. The differences between the two material systems are systematically evaluated through tests on indicators such as specific gravity, viscosity, static pressure filtration loss, compression-resilience performance and shear strength. The results show that under the common proportioning conditions, the specific gravity, viscosity and shear strength of the sodium silicate system are all higher than those of the polymer system, demonstrating its strong inorganic gelation and dense structure characteristics. Polymer systems perform better in terms of filtration loss and compression-resilience properties, and possess the excellent deformation recovery and water retention capabilities. In addition, with the increase of slurry-water ratio, the specific gravity, viscosity, filtration loss and shear strength of the two types of systems all show an upward trend. However, the compressive and resilience properties of the sodium silicate system slightly decreases, while the resilience properties of the polymer system significantly improves, which indicates that the variation of the slurry-water ratio regulates the interaction between particles and the compactness of the network structure, and also reflects the essential differences in the strain recovery mechanism between inorganic gels and organic polymer systems. The performance evolution law of the two-fluid thixotropic slurry under different system and proportion conditions is revealed, providing a theoretical basis and technical support for the optimal design of high-performance, adjustable and environmentally friendly support and lubrication materials in shield tunneling and pipe-jacking construction.

Keywords: tunnel shield; thixotropic slurry; bentonite; sodium silicate; polymer; reaction mechanism

收稿日期: 2026-01-03

作者简介: 袁镇(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 从事市政工程建设工作。

0 引言

随着城市化进程的加速与地下空间开发需求的

持续增长,盾构法与顶管法等非开挖施工技术已广泛应用于地铁、综合管廊及城市隧道工程中。此类施工过程普遍涉及复杂地层条件及长距离掘进,对地层稳定性、设备润滑性与渣土输送性能提出了更高要求。为保障掘进过程的安全与连续性,施工中普遍采用注浆或泥水加压方式对开挖面进行支护与压力平衡。在众多支护材料中,触变泥浆凭借其优良的流变可控性与可逆结构特征,成为维持开挖面稳定、减小地表沉降及优化掘进效率的重要介质。已有研究证明,使用触变泥浆填充策略可以将既有隧道沉降控制在 5 mm 以内,具有极好的填充效果^[1-2]。

触变泥浆是一种具有可逆流变特性的多相分散体系,其核心特征在于“静止呈凝胶、剪切变流体”的可逆转化行为。在静止状态下,膨润土片层颗粒间通过静电吸引、范德华力及氢键作用形成空间网络结构,使泥浆具有较高的黏度与抗沉降能力。在剪切作用下,该结构被破坏,颗粒重新分散,泥浆表现出较好的流动性;停止剪切后,颗粒间作用力使体系逐渐恢复原有网络结构,重新具备支护性能^[3]。正是这种结构的动态平衡,使触变泥浆在掘进施工中兼具可泵送性与自稳性,满足静止可支护、运动可流动的工程要求。

目前,工程中双液注浆体系应用广泛,其中以膨润土为基础的触变泥浆最为常见,通常由改良膨润土、水及少量外加组分构成^[4]。已有众多学者对注浆材料的体系和配比进行了研究。颜静^[5]研究了钙基膨润土浆液与水玻璃混合体系的性能,得出了泥水的比例为 1:2、水玻璃掺量为 6% 时浆体性能最优的结论。Wan 等人^[6]研究了钠基膨润土与改良外加剂、水以及水玻璃之间的影响作用,并且发现随着膨润土浆液含水量的增加会使得与水玻璃之间的化学反应更完全。Sharghi 等人^[7]指出提高膨润土比例有利于早期强度,但可能抑制后期强度,随着施工工况的复杂化与难度提升,对泥浆体系在黏度与滤失量等指标上应提出更高要求。贾丽洲^[8]采用了以膨润土为主,添加多种聚合物的方式来达到润滑减阻以及护壁的目的,最后发现采用膨润土-水-AMPSNNDMA(2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸-N,N-二甲基丙烯酰胺共聚物)体系可兼具较高黏度与较低失水性能。王春婷等人^[9]亦证实在钠基膨润土中引入聚丙烯酰胺有助于减少泥浆的失水量。

然而,在目前的研究中常用配比条件下水玻璃

体系与高分子体系之间性能差异的系统比较仍然缺乏,尤其是在实际应用中,触变泥浆在组成与结构调控路径上呈现多样化,不同体系可能引发材料性能的显著差异。基于此,本文基于钠基膨润土,对比水玻璃与某高分子型外加剂两种触变泥浆体系的宏观与机理差异。试验围绕工程关键指标展开,包括比重、黏度、静滤失量、压缩量及抗剪强度,并结合两类体系的结构演化机理进行讨论,为泥浆体系的科学设计与工程应用提供理论依据。

1 试验过程

1.1 原材料

本研究采用的触变泥浆体系为双液注浆材料体系。双液注浆型触变泥浆体系由 A 液与 B 液在注入后相互作用,快速建立凝胶网络,实现由流态向凝胶态的可控转变,以满足盾构与顶管施工对触变性、封水性与体系稳定性的要求。基于常用材料体系与前期筛选结果,本实验设置了两种不同体系触变泥浆:体系一为钠基膨润土与水玻璃复配(模数为 1.68, pH 值约 12.7,见表 1),混合浆体状态表现为几乎不具备流动性的浆液状;体系二为钠基膨润土和某高分子外加剂复配(见表 2),混合状态具有明显的整体性和弹性,呈现“果冻状”。由于两类体系的配制特性存在差异,水玻璃体系与高分子体系的泥水比及 B 液掺量并不相同。具体而言,水玻璃体系反应速度较快,凝胶强度高,适用于需要快速支护的场景,因此其膨润土掺量相对较高;高分子体系以物理交联为主,侧重润滑与变形协调,适用于对滤失控制与回弹性能要求较高的工况,故其水灰比较大、膨润土掺量相对较低。本研究选取的配比均来源于工程实践与前期试验筛选,具有代表性和可比性。

表 1 水玻璃 B 液配合比

组别	A 液		B 液
	钠基膨润土/g	水/g	水玻璃/mL
A1-B1	200	600	20
A2-B1	220	600	20
A3-B1	250	600	20

表 2 高分子 B 液配合比

组别	A 液		B 液
	钠基膨润土/g	水/g	高分子外加剂/mL
A4-B2	150	960	5
A5-B2	180	960	5
A6-B2	260	960	5

1.2 比重

触变泥浆的比重采用比重杯法测定。测试前将比重杯清洁并擦干,取具有代表性的浆样注入比重杯中,轻轻震动以排除气泡,然后刮去溢出部分,使杯体充满且体积恒定,随后称量总质量,根据浆体质量与比重杯体积计算其比重。

1.3 黏度

参照《液体粘度的测定》(GB/T 22235—2008)规定的方法,采用高精度旋转黏度计开展试验。试验前将旋转黏度计与计算机连接,开机预热约 20 min,并根据样品预估黏度范围选择合适的转子。将浆样置于主机下方,使转子缓慢浸入至液面标记位置,然后静置 3 min,以确保样品温度与转子温度一致。

1.4 滤失量

触变泥浆的失水性能通过静压滤失法进行测试,仪器见图 1。将制备好的 200 mL 浆样倒入带有滤纸的过滤筒中,过滤面积为 45 cm^2 ,上方施加恒定压力为 0.69 MPa,记录规定时间内的滤出水量。试验过程中保持压力稳定,防止气体泄漏或浆体扰动。测试结束后,读取滤液体积并计算失水量。

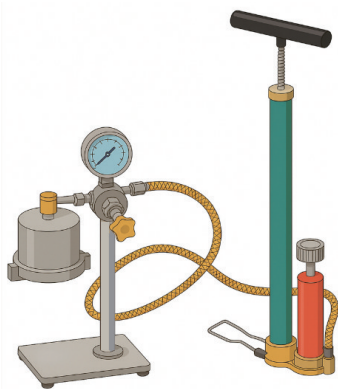


图1 泥浆滤失仪

1.5 压缩-回弹性能

触变泥浆的压缩性能通过静压加载法进行测试。将 50 mL 浆液装入针筒中并封闭下端,保持密封状态后在上端施加 3.5 bar 的恒定压力,记录浆体在受压下的体积变化,以获得其初始压缩量。试验结束后,将样品静置 24 h,测定浆体回弹量。该方法用于表征触变泥浆在外力作用下的可压缩性与结构恢复能力。

1.6 抗剪强度

抗剪强度采用十字板剪切仪进行测定(见图 2)。试验时将十字板缓慢插入静置后的 1 L 浆样正中部,确保扰动最小,然后以恒定转速施加扭矩,记录泥浆被剪切破坏时的最大扭矩值,根据仪器换算关系计

算出对应的抗剪强度。

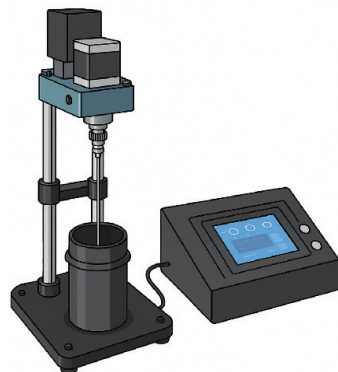


图2 十字板剪切仪

上述所有实验均重复进行 3 次并取其平均值。对于部分波动性较大的指标,采用单因素方差分析进行显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 比重

图 3 展示了不同体系触变泥浆的比重变化规律。可以看出,触变泥浆的比重主要受 A 液膨润土含量与 B 液类型共同控制。总体而言,随着膨润土掺量的增加,两种体系的比重均呈逐渐上升趋势,这主要归因于 A 液中固相体积分数的提高,与 B 液之间的相互作用增强,结构趋于致密。

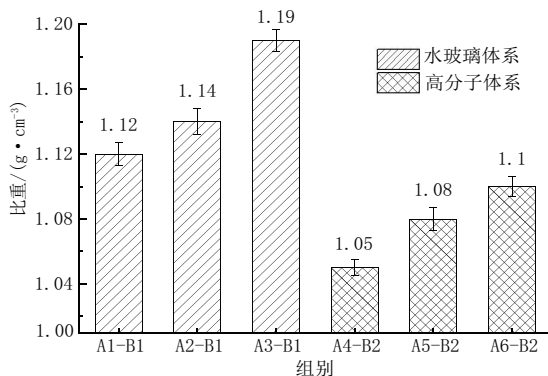


图3 不同体系及配比触变泥浆比重

当采用水玻璃作为 B 液时,比重总体略高于高分子体系,这主要归因于水玻璃与膨润土表面活性位点发生快速反应生成凝胶结构。在该反应过程中,部分自由水被固定在凝胶网络中或转化为结构结合水,不再参与体系体积的扩展,使浆体整体结构更加致密,单位体积内的固相比例更高。在聚合物溶液中,聚合物能够通过氢键或静电作用与水分子结合,形成强吸水性网络结构。这些聚合物链在溶胀后包覆于膨润土颗粒表面或填充于片层间,使体系整体体积显著增大,从而导致比重略低。对

于比重指标,控制在 1.1~1.3 g/cm³ 范围内即有利于减阻和防沉降^[10]。

2.2 黏度

触变泥浆的黏度测试结果如图 4 所示。总体来看,水玻璃以及高分子体系的泥浆黏度随膨润土掺量的增加而显著上升,这与体系中固相体积分数增加、颗粒间相互作用增强密切相关。这主要是由于水玻璃与膨润土浆体之间发生化学反应,体系中蒙脱石晶层表面的铝羟基与水玻璃溶液中的钠离子产生作用,促使片层结构发生电性调整与胶体交联,从而形成稳定的三维凝胶网络^[5]。在 高分子体系中,聚合物分子链富含极性基团吸附于膨润土片层表面或插入其层间,实现链段缠结与桥联。随着膨润土含量增加,吸附位点数量上升,链段间的缠结密度增大,体系形成连续的物理网络,从而提高黏度。然而,当黏度过大时,浆体流动性显著降低,难以在盾壳外均匀铺展,易造成输送阻塞及泵送困难。相反,若黏度过低,则浆体注入地层后易发生流失,无法有效形成封闭的润滑层和支护膜。综合已有研究及工程经验^[2],克泥效泥浆的黏度宜控制在 3.0×10²~6.0×10² dPa·s 范围内。

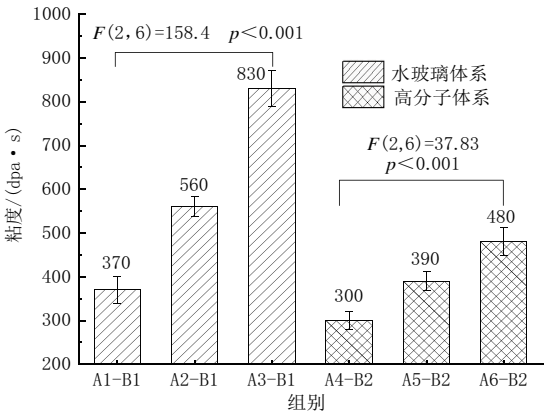


图 4 不同体系及配比触变泥浆黏度

2.3 滤失量

由图 5 可见,两种体系中,当膨润土掺量较低时,浆自由水比例较高,受压后水分容易被排出。此外,高分子体系的滤失量明显低于水玻璃体系,其保水能力和抗滤失性能更优。这是由于高分子外加剂在溶液中形成柔性三维网状结构,能够吸附并束缚大量自由水分,使水分迁移受限,从而减少滤液渗出。水玻璃体系中形成的是无机三维骨架,颗粒间以缩聚桥键相连,结构致密但缺乏柔性,在受压滤失过程中,难以自密实和变形封孔,导致滤饼内部存在微渗通道。结合黏度来看,黏度越大,滤失量越小,

然而当黏度超过适宜范围后,即使滤失量再小,也失去了应用能力。对于性能稳定的触变型泥浆,其滤失量通常应控制在 25 mL 以下^[11],以确保形成结构紧密、连续均匀的泥膜,从而满足注浆过程的施工效率要求。

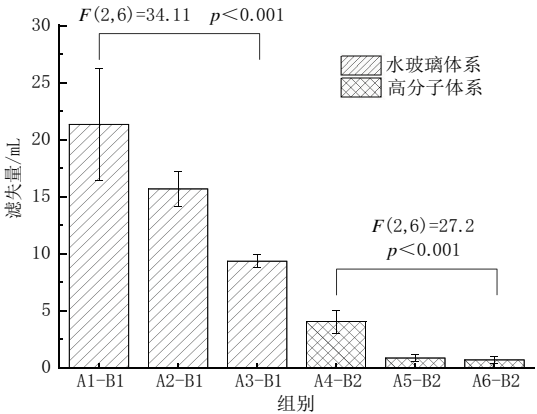


图 5 不同体系及配比触变泥浆滤失量

2.4 压缩-回弹性能

图 6 为不同体系及配比触变泥浆的压缩量与回弹量变化情况。其中水玻璃体系的压缩量随着膨润土量的增加而明显减少,而高分子体系差异不大,并且前者压缩和回弹量明显小于后者。这是因为水玻璃与膨润土形成的刚性骨架在受压后主要发生不可逆压密与局部结构塌陷,卸载后因缺乏柔性链段支撑而回弹有限。相反,高分子体系中的外加剂通过链段缠结与氢键吸附形成柔性三维网状结构,在受压时可发生可逆形变与取向滑移,泄压后链段回缩使得回弹相对明显。

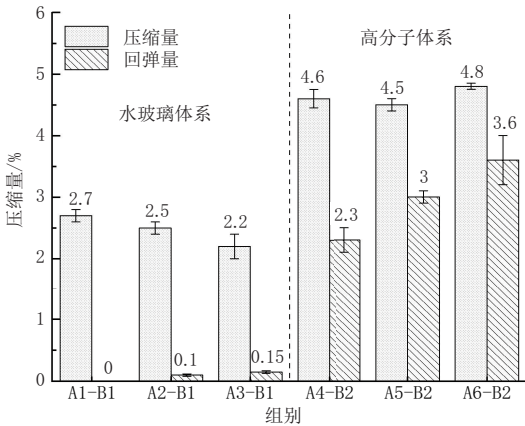


图 6 不同体系及配比触变泥浆压缩性能

2.5 抗剪强度

如图 7 所示,触变泥浆的抗剪强度随膨润土掺量增加而显著提高。对于水玻璃体系来说,随着泥水比的增加,浆体由流态分散体系向结构化胶体体系转变,体系内部形成较强的空间网络结构,使其抵抗

外剪切的能力持续增强。高分子体系存在明显的阈值特征,当膨润土增加至一定量时,体系内固相含量与高分子链的结合位点均显著增多,片层间距减小,空间网络密度增大,产生更强的物理交联与空间约束效应,使抗剪强度急剧上升。

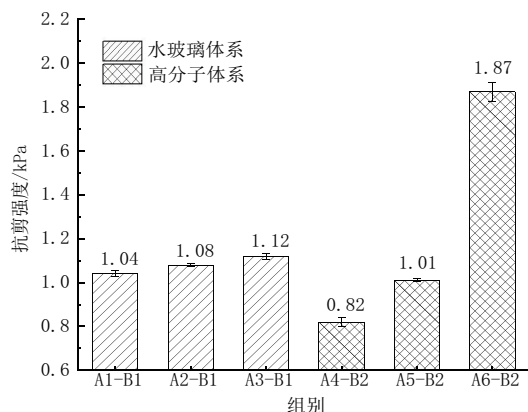


图7 不同体系及配比触变泥浆抗剪强度

3 机理分析

3.1 不同注浆体系作用原理

钠基膨润土的主矿物为蒙脱石^[3],其晶体属于2:1型层状硅酸盐(TOT结构),相邻TOT单元之间存在可扩展的层间隙,为可交换阳离子驻留与水分子进入提供了有效空间。与水接触后,层间 Na^+ 水合并发生离子交换,诱发层间距增大,随后在片层表面形成双电层,边缘位点(Al-OH 、 Si-OH)电荷随pH调控而与带负电的片层产生吸附效应。该电性吸附与范德华作用共同促成片层的弱絮凝与定向错置堆砌,逐步搭建起贯通但低强度的三维骨架^[12]。

膨润土-水玻璃体系的作用机理可概括为“三维骨架与化学凝胶网络的协同”。与水玻璃接触后,体系pH升高并触发硅酸根缩聚,生成硅酸凝胶。该凝胶在片层间与孔隙发生“桥联-填充”作用,并在土体或配水中的多价阳离子存在下进一步稳固。宏观上,浆体由可流动态转变为致密、低渗的凝胶态,从而提升成膜与抗滤失能力。同时,由于化学凝胶的部分不可逆性,体系的再搅拌流动性与触变恢复相应受限(见图8)。

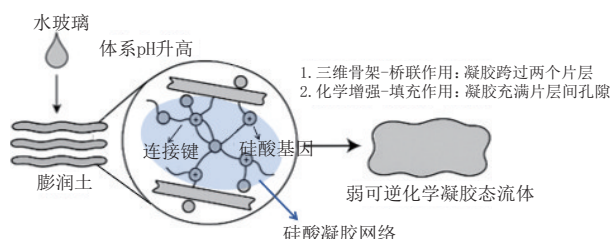


图8 膨润土-水玻璃体系作用机理图

膨润土-高分子外加剂体系的作用机理为“三维骨架的物理增强”。膨润土经水化形成的片层颗粒在加入高分子后,聚合物分子链通过表面吸附、链段缠结及颗粒间桥联作用,构建起柔性的物理网络。静止时该网络提高屈服应力与凝胶强度,剪切时部分解构而黏度下降,剪切停止后可在短小时内自恢复(见图9)。与此同时,聚合物对颗粒的吸附与空间位阻有助于抑制沉降与离析,并与膨润土共同形成更强的滤失性能。然而,该体系对聚合物类型、分子量、离子性及温度较为敏感,需要通过配方与工况参数的匹配来实现目标黏度与滤失控制。

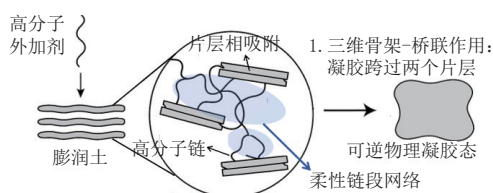


图9 膨润土-高分子外加剂体系作用机理图

3.2 触变泥浆作用分析

在盾构施工过程中,地表沉降通常经历早期沉降、挖掘面沉降、盾构机通过时沉降、盾尾间隙处沉降、后续沉降5个阶段^[13]。其中,第3阶段沉降是由于盾构机推进过程中盾壳与周围土体间产生滑移,导致部分土体不能及时抵抗盾构行进带来的扰动,盾壳与周围土体出现滑移和松弛现象,引起土体位移不均匀沉降,并可能诱发姿态偏差而使盾构偏离既定路线。

触变泥浆能显著改善上述问题,其主要充填于刀盘前腔体与围岩之间,在开挖面形成黏塑性、低渗的胶体软垫与滤饼膜,既能提供支护与塑性缓冲,又可抑制地下水渗流与孔隙水外逸。随着刀盘旋转及土体搅拌,泥浆对渣土起到包裹分散与润滑降阻作用,确保土压传递稳定并减少扰动体积损失。当出现姿态偏差或局部沉降集中时,还可通过定向加量与控压调节实现精确纠偏与沉降控制,从而进一步提升盾构掘进的稳定性与安全性^[14]。

3.3 经济性分析

本研究采用的钠基膨润土价格为1 000元/t,水玻璃为1 450元/t,高分子外加剂为120元/kg。各体系单位体积(每立方米)材料成本统计结果如图10所示。由图10可知,高分子体系的总体成本高于水玻璃体系,其主要原因在于高分子外加剂单价较高,从而提高了整体费用水平。相比之下,该体系中膨润土的用量相对较少,其膨润土支出低于水玻璃体

系。因此,在常规施工条件下,考虑综合性能表现与材料成本因素,A2-B1 方案能够较好满足工程需求。在对资源利用与环境影响要求较高的工程场景中,A6-B2 方案由于膨润土用量相对较低,在资源节约与固废减量方面具有一定优势,但其材料成本相对有所增加。工程实际应用中,可根据项目侧重点在经济性与环境性之间进行合理权衡与选择。

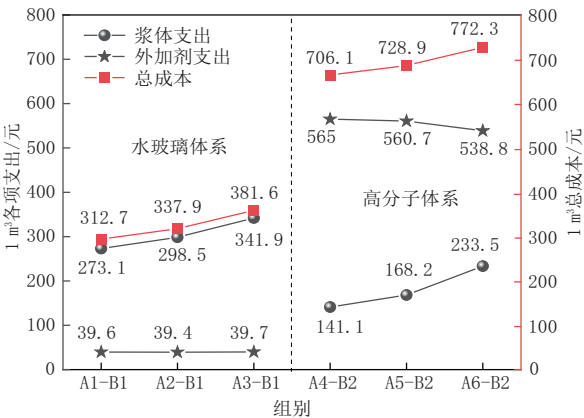


图 10 不同体系及配比每立方米成本

4 结 论

(1)在常用配比范围内:水玻璃体系的比重、黏度、抗剪强度均高于高分子体系,体现出其较强的无机凝胶化特征与结构致密性;高分子体系表现出更优的滤失、压缩与回弹性能,具有较强的可逆触变恢复能力。

(2)随泥水比的增加,两类体系的比重、黏度、滤失量及抗剪强度均呈上升趋势,体系结构逐渐趋于致密。然而,水玻璃体系的压缩与回弹性能略有减弱,而高分子体系的回弹性能显著增强。

(3)触变泥浆的宏观性能差异及其随泥水比变化的规律源于两类体系在结构演化机制上的本质区别:水玻璃体系以化学凝胶化反应为主导,生成刚性

无机骨架;高分子体系以物理缠结与桥联作用为主导,形成柔性网络结构。

(4)高分子体系在膨润土方面支出较低,但受外加剂单价影响,其总体成本仍高于水玻璃体系。

参考文献:

[1] 张梁鹏. 软土地区盾构始发阶段下穿航油管线施工控制技术[J]. 天津建设科技, 2016, 26(2): 48-50.

[2] 杜国涛, 程勇峰. 克泥效同步注入技术在盾构穿越重大风险源中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(3): 190-192.

[3] 胡哲钊. 盾构隧道近距离下穿既有结构物影响及沉降控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.

[4] 陈豪, 张康健, 史勇, 等. 盾构克泥效浆液成分与渗透扩散研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(16): 6916-6926.

[5] 颜静. 盾构近距离下穿既有隧道超挖填充材料特性及沉降控制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2021.

[6] Wan Y, Zhu Z, Song L, et al. Study on temporary filling material of synchronous grouting in the middle of shield[J]. Construction and Building Material, 2021, 273: 121681.

[7] Sharghi M, Chakeri H, Ozcelik Y. Investigation into the effects of two component grout properties on surface settlements[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 205-216.

[8] 贾丽洲, 王伟山, 郑柏存. 顶管施工用新型膨润土与聚合物润滑减阻浆液的性能研究[J]. 施工技术, 2017, 46(6): 102-105.

[9] 王春婷, 隆威. 大口径长距离顶管工程泥浆配方试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(1): 106-111.

[10] 黄宗根. 管幕支护桥涵顶推施工中减阻措施的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2019(1): 130-135.

[11] 欧金辉, 杜升涛, 张通鹏, 等. 甬江浑水及淤泥对膨润土泥浆性能参数影响的实验研究 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2026, 39(1): 44-49.

[12] Luckham P F, Rossi S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions[J]. Advances in colloid and interface science, 1999, 82(1-3): 43-92.

[13] 王中南. 克泥效工法加固隧道开挖的土体应力应变特征及沉降控制[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.

[14] 郑思思, 蒋军. 基于 SPH 方法注浆纠偏既有盾构隧道研究[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(7): 149-154.