

DOI: 10.7672/sgjs2022030001

# 盾构隧道壁后注浆 C-S 双液浆性能研究\*

沈树勋<sup>1</sup>, 於昌荣<sup>2,3</sup>, 包 华<sup>2,3</sup>

(1.南通经济技术开发区综合执法局,江苏 南通 226009; 2.江苏省隧道与地下工程技术研究中心,江苏 南京 210041; 3.南通大学交通与土木工程学院,江苏 南通 226019)

**[摘要]** 对盾构隧道壁后 C-S 双液浆性能指标进行试验研究,结果表明,掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆近似呈 Bingham 塑性流体,可调节的配合比范围较大,随着配合比的增大,不同水玻璃模数浆液塑性黏度与黏聚力均增大,初凝、终凝时间均缩短,结石体早期初凝强度基本增大。掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆较符合假塑性流体,可调节的配合比范围较小,随着配合比的增大,不同水玻璃模数浆液塑性黏度基本增大,初凝时间变化表现出缩短、缓增、激增阶段,结石体早期初凝强度先增大后减小。大模数水玻璃配制的 C-S 双液浆塑性黏度大、稳定性好、强度高,但流动性差,不适用于配制同步注浆浆液。大配合比的 C-S 双液浆塑性黏度大、稳定性好,但流动性差,结石体早期初凝强度不稳定,成本高,建议配合比为 0.08 : 1~0.15 : 1。

**[关键词]** 隧道;盾构;壁后注浆;C-S 双液浆;塑性黏度;配合比;试验研究

**[中图分类号]** TU9

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2022)03-0001-06

## Research on Performance of C-S Double Slurry of Grouting Behind Shield Tunnel Segment

SHEN Shuxun<sup>1</sup>, YU Changrong<sup>2,3</sup>, BAO Hua<sup>2,3</sup>

(1. Law Enforcement Bureau of Nantong Economic and Technological Development Area, Nantong, Jiangsu 226009, China;  
2. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210041, China;  
3. School of Transportation and Civil Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

**Abstract:** The experiment on performance indexes of the cement and sodium silicate mixed grouting slurry (C-S double slurry) behind the shield tunnel segment was implemented. The results show that the C-S double slurry with P·O 42.5 cement is analogous to the Bingham plastic fluid, and the adjustable regulation range of the mixing proportion is wide. With the increase of the mixing proportion, the plastic viscosity and cohesion of different sodium silicate modulus both increases, the initial setting time and final setting time shorten, and the initial setting strength of grouting concretion increases. The C-S double slurry with P·C 32.5 cement is in accordance with the pseudoplastic fluid, and the adjustable regulation range of the mixing proportion is narrow. With the increase of the mixing proportion, the plastic viscosity of different sodium silicate modulus generally increases, the change of initial setting time showed shortening, slow increasing and surge stages, and the initial setting strength of the grouting-concretion raises firstly then declines. The C-S double slurry prepared with large modulus sodium silicate has high plastic viscosity, good stability and high strength, while the liquidity is low and unfit for the synchronous grouting. The large mixing proportion C-S double slurry also possesses the characteristics of high plastic viscosity, good stability and high strength, while the initial setting strength of the grouting concretion is unstable and the cost is high. The suggested mixing proportion is 0.08 : 1~0.15 : 1.

**Keywords:** tunnels; shields; grouting behind segment; C-S double slurry; plastic viscosity; mixing proportion; experimental research

\* 江苏省隧道与地下工程技术研究中心开放基金(201905)

[作者简介] 沈树勋,高级工程师,E-mail:370022388@qq.com

[通信作者] 包 华,教授,E-mail:bao.h@ntu.edu.cn

[收稿日期] 2021-06-19

## 0 引言

在隧道盾构施工过程中,常遇含水砂层、动水砂层等不良地质条件,如果处理不当,易导致工程事故。因此常采用盾构壁后同步注浆填充盾尾间隙,防止土体松弛、地层变形和土粒流失,提高隧道抗渗防水性能,确保管片衬砌早期受力均匀和稳定<sup>[1]</sup>。据统计,盾构隧道同步注浆采用单液浆较多,但双液浆凭借其凝结时间短、强度高、固结体积稳定等优点,将得到越来越多的应用<sup>[2-3]</sup>。

以水泥和水玻璃为主剂,二者按一定比例以双液方式注入,必要时加入附加剂组成注浆材料,称之为水泥-水玻璃浆,即 C-S 双液浆,其克服了单液浆凝结时间长且不易控制、结石率低等缺点,提高了注浆效果,适用于含水量大、渗透性高、软弱不均地层。

目前,关于 C-S 双液浆的研究主要集中于注浆参数控制、壁后注浆评价等。本文通过试验,研究不同水泥品种、水玻璃模数、配合比对 C-S 双液浆性能的影响。

### 1 C-S 双液浆填充加固机理

C-S 双液浆填充加固是物理作用与化学反应的综合结果。

#### 1.1 C-S 双液浆反应机理

水泥凝结和硬化主要由水泥水化析出胶凝体引起,在硅酸三钙水化过程中产生氢氧化钙,当水泥浆液中加入水玻璃后,水玻璃与新生成的氢氧化钙反应,生成具有一定强度的胶凝体-水化硅酸钙。水玻璃与氢氧化钙反应速率较快,随着氢氧化钙逐步消耗,水泥水化反应随之加快,析出的水化硅酸钙越来越多。随着反应的进行,浆液失去塑性和流动性,进一步成为具有一定强度的结石。C-S 双液浆初期强度主要由水玻璃与氢氧化钙反应物提供,后期强度主要由水泥水化反应物提供。水泥水化生成氢氧化钙的量是有限的,过剩的水玻璃使整个胶凝体系稀释,凝结时间延长,强度下降,反而是无益的。

#### 1.2 C-S 双液浆扩散机制

C-S 双液浆通过压力系统注入管片壁后,通过扩散的方式完成填充过程,其扩散方式可归纳为填充注浆、渗透注浆、压密注浆及劈裂注浆阶段<sup>[4]</sup>。填充注浆阶段将浆液填充到盾尾间隙直到充满;渗透注浆阶段利用浆液将土体颗粒间的空气和水挤出;压密注浆阶段利用浆液挤压土体和管片,土体产生塑性变形;在劈裂注浆阶段,当注浆压力大到一定程度,浆液在地层中发生劈裂流动,形成条带

状或脉状胶结体。

C-S 双液浆扩散过程中,A 液(水泥浆液)和 B 液(水玻璃浆液)混合,变为胶态溶液,混合液黏性随时间的增加而增大,随之进入流动态固结区,然后经可塑态固结区达凝固区。

### 2 C-S 双液浆性能要求

由 C-S 双液浆扩散机制可知,为达到较好的壁后同步注浆效果,C-S 双液浆应满足稳定性好(不分散、不离析)、流动性好、填充性好(具有一定强度、胶凝体体积稳定)、防流失性好(不流失、不被稀释、不被冲走)、耐久性好、成本低、无公害等性能要求<sup>[5-6]</sup>。本文基于 C-S 双液浆反应机理,通过组分材料与配合比设计,优化 C-S 双液浆技术参数,控制水化反应和水玻璃反应速率,控制胶凝体(水化硅酸钙)生成速度和生成量,使 C-S 双液浆技术指标满足性能要求。

### 3 试验概况

试验目的是测试不同水泥品种、水玻璃模数、配合比的 C-S 双液浆技术指标,包括塑性黏度、黏聚力(静切力和动切力,其中静切力包括初切力、终切力)、凝结时间及初凝强度。

#### 3.1 原材料

综合考虑凝胶时间、施工技术及成本影响,选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥和 P·C 32.5 复合硅酸盐水泥,将水泥、膨润土、水按质量比 450 : 75 : 785 混合搅拌,制成水灰比约为 1 : 1.75 的 A 液。采用模数为 2.30, 2.85, 3.50 的水玻璃,将 3 种水玻璃与水泥浆液分别按体积配合比 0.05 : 1, 0.08 : 1, 0.10 : 1, 0.12 : 1, 0.15 : 1, 0.20 : 1 制成 C-S 双液浆试样。

#### 3.2 试验设备

C-S 双液浆塑性黏度采用 ZNN-D6 型旋转塑性黏度计测定,室温控制在  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,初凝、终凝时间采用标准稠度测定仪测定,结石体初凝抗压强度采用 GDS 静力三轴试验仪测试。

### 4 试验结果与分析

#### 4.1 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆塑性黏度与黏聚力

试验过程中发现掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆近似呈 Bingham 塑性流体,测得其塑性黏度、动切力、初切力、终切力分别如图 1~4 所示。由图 1 可知,随着体积配合比的增大,不同水玻璃模数试样塑性黏度均增大,增幅随着水玻璃模数的增大而提高。由图 2~4 可知,随着体积配合比的增大,不同水玻璃模数试样黏聚力基本增大,其中水玻璃模数

为 3.50 的试样黏聚力增幅最大,水玻璃模数为 2.30 的试样黏聚力变化较小,受配合比的影响较小。综上所述,掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆试样在相同配合比下,水玻璃模数较大时,塑性黏度和黏聚力均较大。

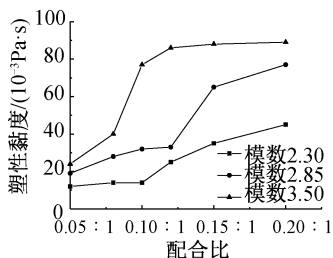


图 1 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆塑性黏度变化曲线

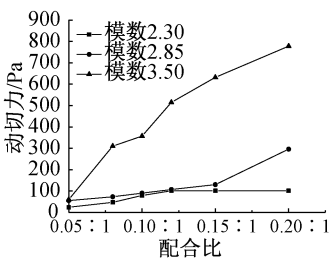


图 2 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆动切力变化曲线

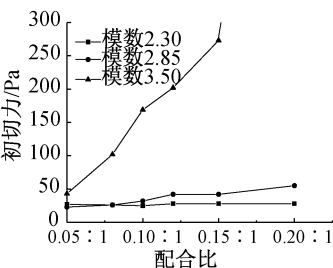


图 3 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆初切力变化曲线

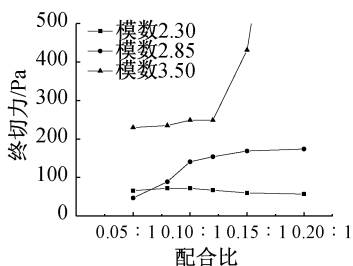


图 4 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆终切力变化曲线

双液浆需满足稳定性要求,即具备一定切力,尤其是静切力。动切力和静切力较高时,有利于双液浆中的固相颗粒发挥悬浮作用。如果静切力太小,易造成固相颗粒沉淀。

4.2 掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆塑性黏度与稠度系数

试验过程中发现掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆

较符合假塑性流体,测得其塑性黏度如图 5 所示。由图 5 可知,随着体积配合比的增大,不同水玻璃模数试样塑性黏度基本增大。由于该双液浆符合假塑性流体,可用稠度系数表示塑性黏度,如图 6 所示。由图 6 可知,不同水玻璃模数试样稠度系数变化规律可分为 2 种趋势:①对于水玻璃模数较大的试样,稠度系数随着配合比的增大而增大;②对于水玻璃模数较小的试样,稠度系数随着配合比的增大略有减小。

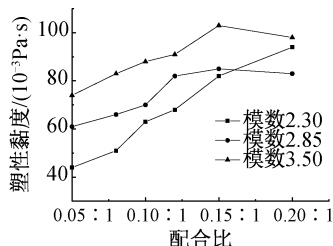


图 5 掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆塑性黏度变化曲线

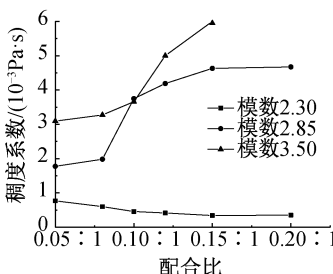


图 6 掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆稠度系数变化曲线

试验研究发现,通过调整双液浆配合比,可在一定范围内增加浆液塑性黏度和黏聚力,可提高浆液抗冲刷能力,但过分提高浆液塑性黏度,对浆液流动性具有一定影响。

4.3 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆初凝、终凝时间

试验测得掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆初凝、终凝时间变化曲线分别如图 7,8 所示。由图 7,8 可知,随着体积配合比的增大,不同水玻璃模数试样初凝、终凝时间均缩短,并趋于稳定,变化过程大致分为以下阶段:①急剧变化阶段 当配合比 < 0.10 : 1 时,试样初凝时间随着配合比的增大迅速缩短;当配合比 < 0.12 : 1 时,试样终凝时间随着配合比的增大迅速缩短。②缓慢变化阶段 当配合比 > 0.10 : 1 时,试样初凝时间受配合比的影响较小;当配合比 > 0.12 : 1 时,终凝时间随着配合比的增大缓慢缩短。

当配合比相同时,对于水玻璃模数较大的试样,初凝、终凝时间较短;对于水玻璃模数较小的试样,初凝、终凝时间较长。

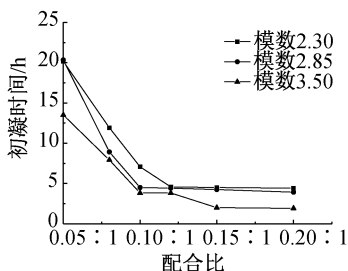


图7 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆初凝时间变化曲线

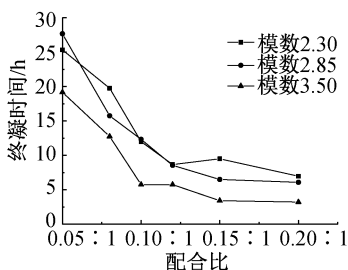


图8 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆终凝时间变化曲线

#### 4.4 掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆初凝、终凝时间

试验测得掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆初凝、终凝时间变化曲线分别如图 9,10 所示。由图 9 可知,随着体积配合比的增大,不同水玻璃模数试样初凝时间变化曲线表现出缩短、缓增、激增阶段。当配合比为 0.05 : 1~0.10 : 1 时,不同水玻璃模数试样初凝时间均随着配合比的增大而缩短,此为缩短阶段。对于水玻璃模数较大的试样,当配合比为 0.10 : 1~0.12 : 1 时,初凝时间随着配合比的增大缓慢增长;对于水玻璃模数较小的试样,当配合比为 0.10 : 1~0.15 : 1 时,初凝时间随着配合比的增大缓慢增长,此为缓增阶段。对于水玻璃模数较大的试样,当配合比 >0.12 : 1 时,初凝时间急剧增长;对于水玻璃模数较小的试样,当配合比 >0.15 : 1 时,初凝时间急剧增长,此为激增阶段。

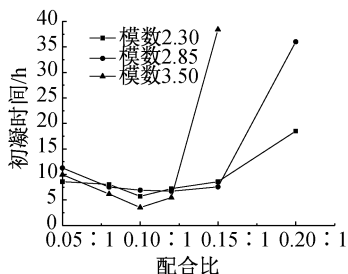


图9 掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆初凝时间变化曲线

由图 10 可知,随着体积配合比的增大,不同水玻璃模数试样终凝时间变化曲线基本表现出缩短、缓增、激增阶段。当配合比为 0.05 : 1~0.08 : 1 时,不同水玻璃模数试样终凝时间均随着配合比的增大而急剧缩短,此为缩短阶段。对于水玻璃模数

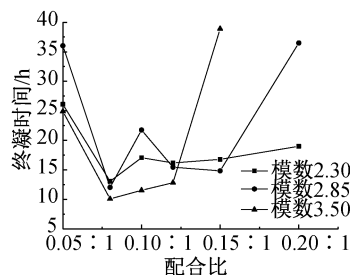


图10 掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆终凝时间变化曲线

较大的试样,当配合比为 0.08 : 1~0.12 : 1 时,终凝时间随着配合比的增大缓慢增长;对于水玻璃模数较小的试样,当配合比为 0.08 : 1~0.15 : 1 时,终凝时间随着配合比的增大呈波动式增长,此为缓增阶段。对于水玻璃模数较大的试样,当配合比 >0.12 : 1 时,终凝时间急剧增长;对于水玻璃模数较小的试样,当配合比 >0.15 : 1 时,终凝时间急剧增长,此为激增阶段。

由图 9,10 可知,当配合比为 0.10 : 1 时,出现最短初凝时间;当配合比为 0.08 : 1 时,出现最短终凝时间。

浆液初凝、终凝时间影响其填充性及防流失性,同步注浆过程中,当浆液渗透或扩散半径(距离)较远时,要求 C-S 双液浆凝结时间足够长;当有地下水运动时,防止浆液过分稀释或被冲走,要求浆液在注入过程中快速凝结,缩短初凝时间。

#### 4.5 初凝强度

对水玻璃模数为 2.85,3.50,水玻璃与水泥浆液体积配合比为 0.05 : 1,0.08 : 1,0.15 : 1,0.20 : 1 的 C-S 双液浆试样结石体早期初凝强度进行了测试。每种配合比下制作 3 个试件,试件制作完成后在 (20±5)℃ 养护箱内养护 (24±1)h,然后利用三轴仪进行加载试验,破坏后的试样如图 11 所示。



图11 破坏后的试样

试样结石体早期初凝强度(取平均值)变化曲线如图 12 所示。由图 12 可知,掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆试样结石体早期初凝强度基本随着配合比的增大而增大;掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆试样结石体早期初凝强度基本随着配合比的增大先增大后减小。

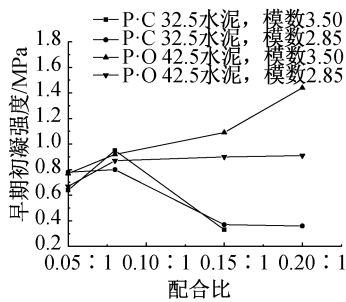


图 12 试样结石体早期初凝强度变化曲线

## 5 C-S 双液浆配合比设计

对于常规 C-S 双液浆,由于凝结时间短,易造成注浆管堵塞、盾尾刷损坏等问题<sup>[7]</sup>,且存在浆液流动性、强度、填充性难以协调等问题<sup>[8]</sup>,因此未被作为同步浆液而广泛采用。本试验设计的 C-S 双液浆可较大幅度地延长凝结时间,可应用于盾构隧道壁后同步注浆施工中。

### 5.1 注意事项

#### 1) 协调流动性与稳定性问题

如果 C-S 双液浆流动性好,可进行长距离压送(尤其是垂直输送),但流动性好的双液浆易出现离析、材料分离等稳定性问题,在注入扩散过程中易被地下水稀释,影响整体注浆效果。

#### 2) 协调流动性与防流失性问题

为提高填充效果,应使 C-S 双液浆具有较好的流动性,但易造成注浆液流至工作面或尾隙以外的区域等,易导致隧道管片壁顶部出现无浆液填充的现象。

#### 3) 协调流动性与填充性问题

一般情况下,如果 C-S 双液浆流动性好,可达到良好填充效果,但会造成特殊部位填充性差(如管片壁顶部等)。填充性要求 C-S 双液浆初凝时间短、胶凝体早期强度不小于原状土、结石体体积收缩率小,而这些要求不利于浆液达到良好流动性。

本试验得到的 C-S 双液浆塑性黏度变化曲线、凝结时间变化曲线及初凝强度变化曲线,为配合比优化设计提供了依据。通过组分材料与配合比设计,满足同步注浆性能要求<sup>[8-9]</sup>。

### 5.2 组分材料与配合比

同步注浆 C-S 双液浆的主要性能指标一般要求为:塑性黏度  $\leq 45 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,凝结时间为 3~10h,1d 结石体早期初凝强度  $\geq 0.2 \text{ MPa}$ 。

进行 C-S 双液浆组分选择时,一般首先考虑采用凝结时间满足要求的材料。采用 P·O 42.5, P·C 32.5 水泥及模数为 2.30, 2.85, 3.50 水玻璃配制的 C-S 双液浆,可在一定配合比下满足 3~10h 凝结时

间的要求。根据试验结果,对于掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆,当配合比为 0.05:1~0.10:1 时,凝结时间变化幅度大,且凝结时间  $> 10\text{h}$ ,不符合双液浆性能要求;当配合比  $> 0.15:1$  时,凝结时间虽满足要求,但经济性较差;当配合比为 0.10:1~0.15:1 时,凝结时间  $< 10\text{h}$ ,且凝结时间变化小,满足双液浆性能要求。对于掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆,仅在配合比为 0.08:1 时终凝时间基本满足性能要求。

确定 C-S 双液浆组分材料与配合比后,应考察双液浆塑性黏度是否满足要求。根据试验结果,对于掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆,当配合比为 0.10:1~0.15:1 时,水玻璃模数为 3.50 的浆液塑性黏度  $> 45 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,不符合性能要求;而水玻璃模数为 2.30, 2.85 的浆液塑性黏度基本符合性能要求。对于掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆,当配合比为 0.08:1 时,水玻璃模数为 3.50 的浆液塑性黏度  $> 45 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,不符合性能要求;而水玻璃模数为 2.30, 2.85 的浆液塑性黏度基本符合性能要求。

经筛选,得到基本符合 C-S 双液浆性能要求的组分、配合比及性能指标,如表 1 所示。由表 1 可知,大模数(3.5)水玻璃配制的 C-S 双液浆塑性黏度大、稳定性好、强度高,但流动性差,不适用于配制同步注浆浆液。强度等级较高的 P·O 42.5 水泥配制的 C-S 双液浆,可调节的配合比范围较大;强度等级较低的 P·C 32.5 水泥配制的 C-S 双液浆,可调节的配合比范围较小。相比而言, P·O 42.5 水泥更适用于配制 A 液。大配合比的 C-S 双液浆塑性黏度大、稳定性好,但流动性差,结石体早期初凝强度不稳定,成本高,建议配合比为 0.08:1~0.15:1。

表 1 C-S 双液浆组分、配合比及性能指标

A 液水泥类型	水玻璃模数	配合比	凝结时间/h	塑性黏度/ $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	1d 结石体初凝强度/MPa
P·O 42.5	3.50	0.10:1	7.0~12.0	14.2	$\geq 0.20$
		0.12:1	4.5~8.7	25.0	$\geq 0.20$
		0.15:1	4.3~9.5	35.0	$\geq 0.20$
	2.85	0.10:1	4.5~12.4	31.7	0.88
		0.12:1	4.5~8.5	33.0	0.89
P·C 32.5	2.30	0.10:1	4.2~6.5	64.8	0.90
		0.15:1	4.2~6.5	64.8	0.90
	2.85	0.08:1	8.0~13.0	51.0	$\geq 0.20$
		0.08:1	7.5~12.0	66.2	0.80

需要说明的是, C-S 双液浆性能指标随 A 液水灰比的变化而变化,增大 A 液水灰比可降低塑性黏度,提高流动性,降低凝结强度。实际工程应用时,应考虑温度、时效性对 C-S 双液浆的影响。必要时可添加外加剂,以改善 C-S 双液浆性能<sup>[10]</sup>。

## 6 结语

1) 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆近似呈 Bingham 塑性流体,其塑性黏度与黏聚力随着配合比的增大而增大。在相同配合比下,水玻璃模数较大时,浆液塑性黏度和黏聚力均较大。

2) 掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆较符合假塑性流体,随着配合比的增大,不同水玻璃模数浆液塑性黏度基本增大。对于水玻璃模数较大的浆液,稠度系数随着配合比的增大而增大;对于水玻璃模数较小的浆液,稠度系数略有减小。

3) 对于掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆,随着配合比的增大,不同水玻璃模数浆液初凝、终凝时间均缩短,并趋于稳定,变化过程大致分为急剧变化阶段、缓慢变化阶段。当配合比相同时,对于水玻璃模数较大的浆液,初凝、终凝时间较短;对于水玻璃模数较小的浆液,初凝、终凝时间较长。

4) 对于掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆,随着配合比的增大,不同水玻璃模数浆液初凝时间变化表现出缩短、缓增、激增阶段。

5) 掺加 P·O 42.5 水泥的双液浆结石体早期初凝强度基本随着配合比的增大而增大;掺加 P·C 32.5 水泥的双液浆结石体早期初凝强度随着配合比的增大先增大后减小。

6) 大模数(3.5)水玻璃配制的 C-S 双液浆塑性黏度大、稳定性好、强度高,但流动性差,不适用于配制同步注浆浆液。

7) 强度等级较高的 P·O 42.5 水泥配制的 C-S 双液浆,可调节的配合比范围较大;强度等级较低的 P·C 32.5 水泥配制的 C-S 双液浆,可调节的配合比范围较小。相比而言,P·O 42.5 水泥更适用于配制 A 液。

8) 大配合比的 C-S 双液浆塑性黏度大、稳定性好,但流动性差,结石体早期初凝强度不稳定,成本高,建议配合比为 0.08 : 1~0.15 : 1。

### 参考文献:

- [1] 於昌荣.砂砾地层盾构施工注浆效应及作用机理研究[D].上海:上海交通大学,2011.
- [2] 叶飞,毛家骅,纪明,等.盾构隧道壁后注浆研究现状及发展趋势[J].隧道建设,2015,35(8):739-752.
- [3] 有智慧,李雪,霍鹏,等.城市轨道交通盾构同步注浆国内外现状及发展[J].都市轨快交通,2020,33(4):72-83.
- [4] 苟长飞.盾构隧道壁后注浆浆液扩散机理研究[D].西安:长安大学,2013.
- [5] 张凤祥,朱合华,傅德明.盾构隧道[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [6] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组.岩土注浆理论与工程实例[M].北京:科学出版社,2001.
- [7] 王成,王国义.盾构隧道同步注浆新型双液注浆材料的研究与应用[J].隧道建设,2017,37(4):416-420.
- [8] 周麟,毛文,施墨华.盾构隧道同步注浆浆液配合比优化设计[J].武汉工程大学学报,2013,35(9):29-33.
- [9] 贾毅,李福海,吴德宝,等.盾构隧道壁后同步注双液浆配合比试验研究[J].现代隧道技术,2019,56(2):143-151,157.
- [10] 杨卓,陈洪光.盾构隧道同步注浆浆液配比分析及优化设计[J].隧道建设,2009,29(S2):29-32.