

# 沿海地区地铁盾构施工注浆材料设计研究

Design and Research of Grouting Materials for Shield Construction of Metro in Coastal Areas

彭 飞

(北京市政路桥集团(广州)建设有限公司, 广东 广州 510700)

**摘要:** 受海水环境影响, 常规盾构注浆材料不能完全适用于沿海地区地铁隧道盾构工程施工建设。为研究开发出能够适应海水环境的新型盾构注浆材料, 室内利用高炉矿渣粉末 (BFSP) 替代常见注浆材料中的粉煤灰成分, 并对新型 BFSP 改性盾构注浆材料开展了综合性研究试验。研究发现: (1) 海水拌制浆液的流动性强于淡水拌制浆液, 凝结时间较短, 剪切强度更低。淡/海水拌制浆液的坍落度分别为 126 mm、135 mm, 初凝时间分别为 105 min 和 91 min, 终凝时间分别为 195 min 和 172 min, 剪切屈服强度分别为 0.36 kPa 和 0.28 kPa; (2) 海水环境下基础盾构注浆浆液 (OBFSP) 坍落度可为 135 mm, 随着 BFSP 掺量的逐渐增大, 新型注浆浆液的坍落度逐渐降低, 相较于基础盾构注浆浆液分别下降 0.74%、2.22%、15.56%、24.44% 以及 37.04%; (3) BFSP 材料的掺入显著的缩短了新型注浆浆液的凝结时间, 提高了结石试样的抗压强度; 材料掺量对结石体抗压强度的影响较为复杂, 养护龄期较长条件下, 抗折强度呈现出先增大后减小的变化趋势; (4) 当 BFSP 掺量为 20% 时新型盾构注浆材料的综合性能最佳, 此时其坍落度为 123 mm, 初凝时间为 60 min, 终凝时间为 109 min, 28 d 抗压强度为 38.82 MPa, 28 d 抗折强度为 4.68 MPa。

**关键词:** 地铁盾构, 注浆材料, 高炉矿渣粉末, 海水环境, 凝结时间, 最优配比

**中图分类号:** U455.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 05-0065-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.011

PENG Fei

(Beijing Municipal Road and Bridge Group (Guangzhou) Construction Co., Ltd., Guangzhou 510700, China)

**Abstract:** Due to the influence of sea water environment, conventional shield grouting materials can not be fully applicable to the construction of metro tunnel shield in coastal areas. In order to research and develop a new type of shield grouting material that can adapt to the seawater environment, blast furnace slag powder (BFSP) is used to replace the fly ash in common grouting materials in the laboratory, and comprehensive research and tests are carried out on the new type of BFSP modified shield grouting material. The results show that: (1) the fluidity of seawater mixed pulping liquid is stronger than that of fresh water mixed pulping liquid, the setting time is shorter, and the shear strength is lower. The slump of fresh/seawater mixed slurry is 126 mm and 135 mm respectively, the initial setting time is 105 min and 91 min respectively, the final setting time is 195 min and 172 min respectively, and the shear yield strength is 0.36 kPa and 0.28 kPa respectively; (2) The slump of the foundation shield grouting slurry (OBFSP) under the seawater environment can be 135 mm. With the gradual increase of BFSP content, the slump of the new grouting slurry gradually decreases, which is 0.74%, 2.22%, 15.56%, 24.44% and 37.04% lower than that of the foundation shield grouting slurry respectively; (3) The addition of

作者简介: 彭飞 (1978—), 男, 本科, 主要研究方向: 盾构法施工。

收稿日期: 2022-09-06

## 材料科学

BFSP material significantly shortens the setting time of the new grouting slurry and improves the compressive strength of the stone sample; The influence of material content on the flexural strength of stone body is complex. Under the condition of long curing period, the flexural strength shows a trend of increasing first and then decreasing; (4) When the BFSP content is 20%, the comprehensive performance of the new shield grouting material is the best. At this time, the slump is 123 mm, the initial setting time is 60 min, the final setting time is 109 min, the 28 d compressive strength is 38.82 MPa, and the 28 d flexural strength is 4.68 MPa.

**Keywords:** metro shield; grouting materials; blast furnace slag powder; seawater environment; setting time; optimal ratio

## 0 引言

随着经济的高速发展,我国东部沿海城市的地下交通系统建设也越来越快。在沿海城市地下隧道盾构过程,由于海水具有侵蚀性,常规盾构注浆材料不能完全适用于沿海地区地铁隧道盾构工程施工建设<sup>[1-3]</sup>。因此,研究开发出一种能适用于沿海城市地铁隧道盾构工程的盾构注浆材料具有重要意义。

在内陆城市地铁盾构建设中,由于地铁工程建设要求,盾构注浆材料常具有优越的充填性、良好的施工、和易性和流动性、硬化快以及早期强度高的优势,才能够满足地铁隧道盾构的要求<sup>[4-8]</sup>。目前,我国地铁建设中常用的地铁盾构注浆材料有单液惰性注浆液、单液硬性注浆液以及水泥-水玻璃双液浆<sup>[9-12]</sup>。然而,现有注浆浆液均存在一定的局限性,如,单液惰性浆液硬化后的早期强度和后期强度低、单液硬性浆液凝结硬化慢、双液注浆材料凝结时间难以控制等<sup>[13-15]</sup>。此外,由于海水的侵蚀性,常规的注浆浆液并不能完全适用于沿海地区地铁隧道盾构工程施工建设中。然而,在现有研究成果中,很少涉及到适用于沿海地区地铁隧道盾构工程施工盾构注浆浆液的研究。因此,为研究开发出能够适应海水环境的新型盾构注浆材料,室内利用高炉矿渣粉末

(BFSP) 替代常见注浆材料中的粉煤灰成分,并对新型 BFSP 改性盾构注浆材料开展了综合性研究试验。研究成果为我国沿海地铁盾构施工提供了一定的借鉴作用。

## 1 试验

### 1.1 原材料

本次试验研究所用的基础盾构注浆浆液为沿海地区某地铁盾构中所使用的一种高浓度单液惰性浆,注浆材料的主要成分如下:(1)细砂。平均细度模数为 2.5,含泥量低于 2%;(2)水泥。P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥;(3)熟石灰。氢氧化钙含量高于 85%;(4)粉煤灰。F 类、II 级粉煤灰;(5)膨润土。200 目筛余量低于 5%的膨润土;(6)市政用水。基础盾构浆液的配比如下表 1 所示。选用高炉矿渣粉末(BFSP)作为改性材料,对基础盾构注浆浆液进行改性,制备得到新型 BFSP 改性盾构注浆浆液。BFSP 材料的密度为 1.355 g/cm<sup>3</sup>,整体呈乳白色,主要成分如下表 2 所示。此外,采用水玻璃和氢氧化钠制备碱性激发剂溶液,其中水玻璃的模数为 3.27,氢氧化钠纯度为 98%。

表 1 基础盾构注浆浆液配比

水泥	熟石灰	粉煤灰	膨润土	细砂	水
25	80	300	50	1290	300

表 2 BFSP 化学成分及含量

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	/%
26.22	15.01	0.40	0.54	39.23	11.69	0.47	0.43	0.035	2.01	2.27	

### 1.2 注浆材料制备

根据试验配比方案中不同的粉料比例称量出所需的每种原材料粉料,将其置于 JJ-5 型行星式水泥搅拌机中干搅 5 min,使粉料之间充分混

合均匀。然后,按照相应的液固比向粉料中缓慢加入配置好的激发剂溶液,继续搅拌 3 min。搅拌完成后,将混合均匀的胶凝材料浆液分别倒入尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm 三联试模中浇筑

试样,用以测试其抗压及抗折强度;倒入尺寸为 50 mm × 100 mm 的圆柱型试模中浇筑试样,用以测试其弹性模量。浇筑完成的试样在标准养护条件下(温度 20±2 ℃、相对湿度 ≥ 95%)养护 24 h 后脱模,脱模后继续在标准养护条件下养护至试验龄期,然后进行抗折和抗压强度以及弹性模量测试,养护龄期分别为 3 d、7 d 和 28 d。

### 1.3 试验方案

为研究高炉矿渣粉末掺量以及海水对盾构注浆浆液工程性能的影响,本次试验共分为两个部分,具体如下:

(1) 第一组试验。第一组试验的研究目的在于评价海水(表 3)对注浆材料性能的影响,因此,分别利用市政淡水和海水拌制注浆材料,并对不同试样展开坍落度试验、凝结时间试验和十字板剪切试验,获取不同试样的注浆性能参数。

(2) 第二试验组。采用 BFSP 替代原注浆材料中的粉煤灰成分,替代比例分别为 0(对照组)、10%、20%、30%、40%和 50%,按照制备流程得到试样。此外,第二试验组全部采用海水拌制。为综合判断新型 BFSP 改性盾构注浆浆液的性能,室内展开了流动度试验、凝结时间试验、抗压强度试验以及抗折强度试验,全面评价新型注浆材料的注浆性能。

表 3 海水水质检测结果

Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	pH
6089.26	855.36	91.02	408.33	7.09

## 2 海水影响分析

表 4 不同拌制方式下盾构浆液注浆性能参数对比

Table 4 Comparison of grouting performance parameters of shield slurry under different mixing methods

拌制方式	坍落度 /mm	初凝时间 /min	终凝时间 /min	剪切屈服强度/kPa
淡水	126	105	195	0.36
海水	135	91	172	0.28

表 4 展示了不同拌制方式下盾构浆液注浆性能参数对比结果,由表 4 可知,在两种不同拌制方式下,盾构浆液的参数存在较大的差异,具体如下:

(1) 淡水拌制浆液的坍落度为 126 mm,海水

拌制浆液的坍落度为 135 mm,这表明海水拌制浆液的流动性强于淡水拌制浆液,分析认为,这是由于海水中的氯盐起到了一定程度的减水剂作用,因此,海水拌制浆液流动性要强于淡水拌制的浆液。

(2) 淡水拌制浆液的初凝时间和终凝时间分别为 105 min 和 195 min,海水拌制浆液的初凝时间和终凝时间分别为 91 min 和 172 min,这表明海水拌制浆液较淡水拌制浆液的凝结时间较短,分析认为,这是由于海水中的氯盐具有早强作用。

(3) 淡水拌制浆液的剪切屈服强度为 0.36 kPa,而海水拌制浆液的剪切屈服强度仅为 0.28 kPa,较淡水拌制浆液降低 22.22%,下降幅度非常明显。由此可见,在海水对同步注浆过程中,由于海水对注浆浆液抗剪切屈服强度具有劣化作用,因此管片抵抗上浮的能力变弱,对沿海地区盾构工程建设带来很大的挑战。

## 3 新型盾构浆液设计

### 3.1 坍落度

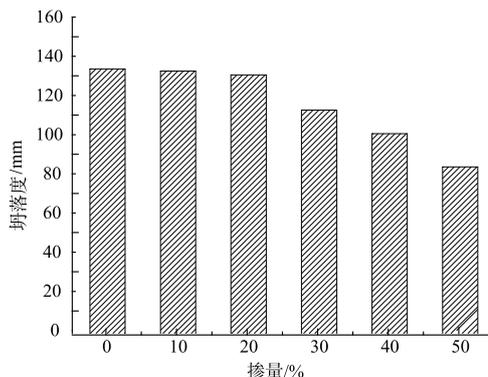


图 1 不同 BFSP 掺量条件下新型盾构注浆浆液坍落度变化  
Fig. 1 Slump change of grouting slurry for new shield under different BFSP content

图 1 展示了不同 BFSP 掺量条件下新型盾构注浆浆液坍落度变化规律,由图 1 可知,BFSP 材料的掺入导致新型注浆浆液的流动能力显著弱化。对于基础盾构注浆浆液(OBFSP)而言,其坍落度可以达到 135 mm,而随着 BFSP 掺量的逐渐增大,新型注浆浆液的坍落度逐渐降低,分别为 134 mm、132 mm、114 mm、102 mm 和 85 mm,相较于基础盾构注浆浆液分别下降 0.74%、2.22%、

## 材料科学

15.56%、24.44%以及37.04%。分析认为,在胶凝材料中掺入一定量的BFSP材料后,由于不同混合物之间粉料(BFSP/粉煤灰)物理性质具有差异,因此其与胶凝材料发生的化学反应也存在差异性。现有成果表明:粉煤灰颗粒呈圆球状,有益于胶凝材料的流动性;矿渣颗粒是无规则棱角状,不利于胶凝材料的流动性。因此,随着注浆材料中BFSP替代掺量的增加,新型盾构注浆浆液的坍落度也逐渐减小。此外,进一步观察可以得知,当BFSP的替代量低于20%时,注浆浆液的坍落度损失速度较慢;而当BFSP的替代量大于20%时,注浆浆液的坍落度损失率迅速增大。因此,选用10%或20%的BFSP部分替代粉煤灰制备新型盾构注浆浆液是较为合理的。

### 3.2 凝结时间

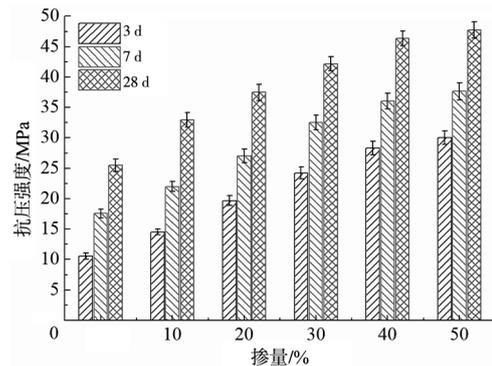
表5 不同BFSP替代掺量条件下新型盾构注浆浆液凝结时间  
Table 5 Setting time of new type shield grouting slurry under different BFSP substitutions

BFSP 掺量 /%	初凝		终凝	
	初凝时间 /min	初凝时间 缩减率/%	终凝时间 /min	终凝时间 缩减率/%
0	105	0	195	0
10	90	14.29	150	23.08
20	60	42.86	109	44.10
30	51	51.43	95	51.28
40	42	60.00	70	64.10
50	35	66.67	55	71.79

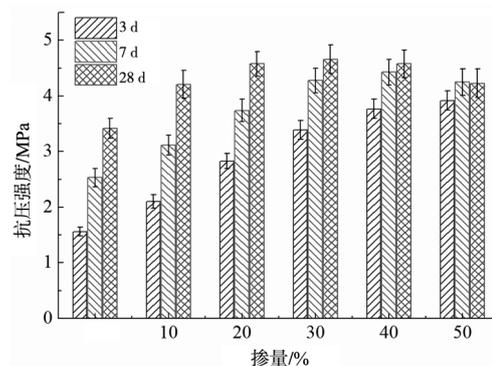
表5展示了新型盾构注浆浆液凝结时间随BFSP替代掺量条件下变化关系,由表5可知,BFSP材料的掺入显著的缩短了新型注浆浆液的凝结时间,加快了注浆浆液的凝结速度。对于基础盾构注浆浆液(OBFSP)而言,其初凝时间( $t_0$ )和终凝时间( $t_s$ )分为105 min和195 min,而随着BFSP掺量的逐渐增大,新型注浆浆液的凝结时间也逐渐缩短。不同BFSP替代掺量条件下,新型盾构注浆浆液初凝时间分别缩短至90 min、60 min、51 min、42 min和35 min,终凝时间分别缩短至150 min、109 min、95 min、70 min以及55 min。分析认为,由表5可知BFSP中氧化钙成分含量较高,因此,当用BFSP替代粉煤灰掺入胶凝材料后,整个胶凝粉料体系中钙元素的含量产生了一定的增加。根据现有研究可知,在注浆材料制

备过程中,发生碱激发反应是钙离子会从粉料中快速溶解出来并产生C-(A)-S-H凝胶物。而正是C-(A)-S-H凝胶的不断析出和絮凝,组成了凝胶产物的基本骨架,决定了胶凝材料的凝结时间。此外,C-(A)-S-H凝胶的不断析出需要消耗体系中释放出的钙离子,从而会加速粉料颗粒的不断溶解。因此,用BFSP材料替代粉煤灰后,胶凝材料体系中钙含量的增高,造成大量的C-(A)-S-H凝胶在短时间内快速生成,既而缩短了盾构注浆浆液在常温下的凝结速率。

### 3.3 抗压强度与抗折强度



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

图2 新型盾构注浆材料试块抗压强度及抗折强度的变化规律  
Fig. 2 Change law of compression strength and flexural strength of stone sample of new shield grouting material

图3展示了不同BFSP掺量条件下新型盾构注浆材料凝固后抗压强度及抗折强度的变化规律,由图3可知,BFSP材料的掺入导致新型注浆浆液的抗压强度得到了明显的提升。以养护时间为3 d的试样为例,对于基础盾构注浆浆液(OBFSP)而言,其硬化试样的抗压强度为8.95 MPa;随着

BFSP 材料掺量的增加, 其抗压强度分别达到 13.11 MPa、21.15 MPa、22.65 MPa、23.51 MPa 以及 25.07 MPa。分析认为, 这主要是由于激发剂浓度的增大增加了浆液体系的碱度, 有助于促进碱激发反应的进行和胶凝粉料的颗粒的溶解, 从而生成更多的凝胶产物, 提高了硬化浆体的密实性和降低了基体的空隙率, 因此其抗压强度随 BFSP 掺量的增大而逐渐增大。

而对于新型盾构注浆材料凝固后抗折强度, 由图 3 可知, 随着 BFSP 掺量的增大, 不同养护龄期下硬化试样的抗折强度表现出不同的变化趋势。当养护时间为 3 d 时, 硬化试样的抗折强度随着 BFSP 材料掺量的增加而逐渐增大; 当养护时间为 7 d 和 28 d 时, 硬化试样的抗折强度均呈现出先增大后减小的变化趋势且最大抗折强度分别出现在 40%BFSP 掺量组以及 30%BFSP 掺量组。

### 3.4 最优配比设计

根据上述试验结果可知, 在不同的 BFSP 材料掺量的条件下, 新型盾构注浆材料性质存在较大的差异。一方面, BFSP 材料掺量的增加, 会提升新型盾构注浆材料的凝结速度和抗压强度; 另一方面, BFSP 材料的流动性则呈现出明显的劣化。此外, 当养护时间较长时, 硬化试样的抗折强度则呈现出先增大后减小的变化趋势。在综合考虑各项参数的情况下, 当 BFSP 掺量为 20% 时新型盾构注浆材料的综合性能最佳, 此时其坍落度为 123 mm, 初凝时间为 60 min, 终凝时间为 109 min, 28 d 抗压强度为 38.82 MPa, 28 d 抗折强度为 4.68 MPa。

## 4 结论

(1) 不同用水环境下, 海水拌制浆液的流动性强于淡水拌制浆液, 凝结时间较短, 剪切强度更低。淡/海水拌制浆液的坍落度分别为 126 mm、135 mm, 初凝时间分别为 105 min 和 91 min, 终凝时间分别为 195 min 和 172 min, 剪切屈服强度分别为 0.36 kPa 和 0.28 kPa。

(2) 对于基础盾构注浆浆液 (0BFSP) 而言, 其坍落度可以达到 135 mm, 而随着 BFSP 掺量的

逐渐增大, 新型注浆浆液的坍落度逐渐降低, 分别为 134 mm、132 mm、114 mm、102 mm 和 85 mm, 相较于基础盾构注浆浆液分别下降 0.74%、2.22%、15.56%、24.44% 以及 37.04%。

(3) 对于基础盾构注浆浆液 (0%BFSP) 而言, 其初凝时间和终凝时间分为 105 min 和 195 min, 而随着 BFSP 掺量的逐渐增大, 新型盾构注浆浆液初凝时间分别缩短至 90 min、60 min、51 min、42 min 和 35 min, 终凝时间分别缩短至 150 min、109 min、95 min、70 min 以及 55 min。

(4) 当 BFSP 掺量为 20% 时新型盾构注浆材料的综合性能最佳, 此时其坍落度为 123 mm, 初凝时间为 60 min, 终凝时间为 109 min, 28 d 抗压强度为 38.82 MPa, 28 d 抗折强度为 4.68 MPa。

## 参 考 文 献

- [1] 王红涛. 地铁盾构隧道下穿铁路大桥数值模拟研究 [J]. 四川建筑, 2022, 42 (4): 174-176+179.
- [2] 刘浩, 种记鑫, 李甲森, 等. 地铁盾构施工对邻近区域的扰动研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (S1): 312-317+325.
- [3] 吉力此且, 路军富, 王国义. 大粒径卵石地层土压平衡盾构施工的渣土改良 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (8): 126-131.
- [4] 王爱华. 地铁盾构高性能同步注浆材料的应用研究 [J]. 现代交通技术, 2021, 18 (5): 78-82+87.
- [5] 常刚民. 富水软土地层地铁区间变形控制注浆技术 [J]. 市政技术, 2021, 39 (9): 97-101+107.
- [6] 杨显维, 田镇. 多功能增塑开放剂在地铁盾构同步注浆中的应用研究 [J]. 天津建设科技, 2021, 31 (4): 59-60+63.
- [7] 覃朝辉. 地铁盾构区间管片拆除施工技术 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48 (15): 49-50.
- [8] 肖敏华, 刘娉婷. 城市地铁盾构注浆加固材料配比及应用 [J]. 江西建材, 2021 (7): 191-192.
- [9] 李明. 黏土水泥浆液在盾构法地铁隧道穿越松散回填区施工中的应用 [J]. 市政技术, 2021, 39 (4): 106-110.
- [10] 魏世广, 蒋敏敏, 肖昭然, 等. 竖向荷载作用下盾构开挖引起的桩身竖向响应分析 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2020, 42 (6): 68-72.
- [11] 蔡巨伟. 地铁盾构掘进施工工效对工程成本影响幅度的研究 [J]. 工程建设与设计, 2019 (24): 236-238.
- [12] 贾建平. 地铁盾构隧道掘进中的同步注浆施工技术 [J].

材料科学

工程技术研究, 2019, 4 (18): 39-40.

[13] 薛长鹏. 地铁盾构机进出洞洞门土体注浆加固技术研究 [J]. 中国设备工程, 2019 (10): 200-201.

[14] 刘申. 城市富水砂卵石地层地铁盾构掘进面的稳定性控制技术 [J]. 建筑技术开发, 2019, 46 (3): 102-103.

[15] 孟祥连, 赵晓彦, 范智浩, 等. 昆明泥炭质土地铁盾构等代层压缩模量试验研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25 (6): 1617-1623.

欢迎订阅 2024 年《新型建筑材料》月刊

邮发代号: 32-57

- 中国科技核心期刊
- RCCSE 中国核心学术期刊
- 全国建材优秀期刊
- 全国建材系列期刊
- 浙江省及华东地区优秀期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 美国 EBSCO 数据库全文收录
- 中国科技论文统计源期刊
- “世界期刊影响力指数 (WJCI) 报告”入编期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

主要栏目及内容: 新型墙体材料、建筑石膏与胶凝材料、防水屋面材料、装饰装修材料、化学建材、保温材料与建筑节能、混凝土与制品、海绵城市、绿色建筑与绿色建材、理论研究与发展综述, 以及国家产业政策等。

1974 年创刊, 由中国新型建材设计研究院主办, 中国建筑材料科学研究总院主管。刊号: CN 33-1078/TU, ISSN 1001-702X。大 16 开, 进口纸胶印 160 页。国内外公开发行。

定价: 每期 8.00 元, 全年 12 期共 96.00 元 (含邮费)。

各地邮局及本刊均可办理订阅手续。

另有历年合订本发行。

本刊承接广告, 欢迎联系。

地址: 310022 杭州市拱墅区华中路 208 号

电话: 0571-85175100, 85062600, 85066556

http://www.china-nbm.cn

E-mail: nbm999@163.com



欢迎关注本刊微信公众号