

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.009

风化岩层岩渣配制的盾构同步注浆浆液 性能及微观形貌分析

王义盛¹, 赵小鹏¹, 袁锐^{2,3}, 李鹏飞^{2,3}, 姚占虎¹, 王登峰^{2,3}, 闵凡路^{2,3}

(1. 中交隧道工程局有限公司, 北京 100102;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学土木与交通工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为探索泥水盾构穿越风化岩层时产生的大量岩渣的再利用问题, 依托南京和燕路过江通道工程, 采用岩渣代替部分商品砂配制同步注浆浆液, 并测试了浆液流动度、稠度、凝结时间、泌水率及强度等指标, 分析了岩渣配制同步注浆浆液的性能及微观结构。结果表明: 随着岩渣替换商品砂比例的增大, 浆液流动度、稠度和泌水率逐渐降低, 而凝结时间呈缩短趋势, 1 d 抗压强度也逐渐增大; 替换比例在 50% ~ 85% 时, 浆液各项性能均满足工程施工要求, 当替换比例为 85% 时, 浆液流动度、稠度与现场浆液接近, 凝结时间从 10.6 h 缩短至 7.3 h, 1 d 抗压强度增强了近 1 倍; 岩渣中含有的高岭石相矿物在水中会电解出 Al^{3+} , 促进了浆液中 C-S-H 凝胶的形成, 是促使浆液凝结时间缩短和抗压强度增大的根本原因。

关键词: 泥水盾构; 同步注浆; 风化岩层; 岩渣; 凝结时间; 微观形貌

中图分类号: U454

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)04-0065-07

Analysis on performance and micro morphology of shield synchronous grouting slurry made of weathered rock slag

WANG Yisheng¹, ZHAO Xiaopeng¹, YUAN Rui^{2,3}, LI Pengfei^{2,3}, YAO Zhanhu¹, WANG Dengfeng^{2,3}, MIN Fanlu^{2,3}

(1. CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to solve the problem of reusing a large amount of rock slag when the slurry shield passes through the weathered rock stratum, relying on the Nanjing Heyan road crossing-river project, the rock slag is used to replace part of commercial sand to prepare the synchronous grouting slurry. The fluidity, consistency, setting time, bleeding rate and strength of the slurry are tested through laboratory tests, and the performance and micro morphology of shield synchronous grouting slurry made of weathered rock slag are analyzed. The results show that: with the increase of the proportion of rock slag replacing commercial sand (denote as the replacing ratio), the fluidity, consistency and bleeding rate of the slurry decrease, while the setting time shows a decreasing trend, and the compressive strength gradually increases after 1 day. When the replacing ratio is 50% to 85%, all properties of the slurry can meet the requirements of engineering construction; when the replacing ratio of rock slag is 85%, the fluidity and consistency of the slurry are close to those of the on-site slurry, the setting time is shortened from 10.6 h to 7.3 h, and the 1-day compressive strength is nearly doubled. Kaolinite phase minerals contained in the rock slag will electrolyze Al^{3+} in water, which promotes the formation of C-S-H gel in the slurry, and is the fundamental reason for shortening the setting time of the slurry and increasing the compressive strength of the slurry.

Key words: slurry shield; synchronous grouting; weathered rock strata; rock slag; setting time; micro morphology

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078189); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B230201037)

作者简介: 王义盛(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事盾构隧道研究。E-mail: 312422586@qq.com

引用本文: 王义盛, 赵小鹏, 袁锐, 等. 风化岩层岩渣配制的盾构同步注浆浆液性能及微观形貌分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 65-71.

WANG Yisheng, ZHAO Xiaopeng, YUAN Rui, et al. Analysis on performance and micro morphology of shield synchronous grouting slurry made of weathered rock slag[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 65-71.

近年来,泥水盾构工法以其高安全性和优越的压力控制模式在我国大型水下交通隧道工程中应用越来越多^[1-3]。泥水盾构产生的大量废弃泥浆,经泥水处理系统处理后,粗颗粒被分离出来,剩余泥砂作为废弃渣土进行处理。目前工程中废弃渣土常用的处理方式为外运填埋,这不仅占用了大量的土地资源,还易造成二次污染,对环境产生负面影响。此外,渣土本身就是一种资源,外运填埋的处理方式造成了极大的资源浪费。因此,如何实现大量废弃渣土的绿色处理及资源化利用成了工程中亟须解决的问题之一。

盾构机掘进过程中,因其工法原理导致盾尾管片与地层之间存在 15~25 cm 的空隙,工程中通常会通过同步注浆的方式填充空隙,以减少地层沉降^[4]。同步注浆浆液主要由水泥、粉煤灰等胶凝材料以及砂和水组成,其中砂的含量在 50% 以上,是重要的组成成分。因此探究盾构渣土代替砂在同步注浆中的再利用具有一定的工程价值^[5]。

目前针对废弃渣土配制同步注浆浆液的研究,主要是围绕废弃渣土用于配制同步注浆浆液的配比、性能优化和经济性分析等方面开展的。钟小春等^[6]用南京长江隧道工程排出的未处理粉细砂部分替代商品砂,直接用于配制同步注浆浆液,所制浆液随着土砂比(粉黏粒与砂土干质量之比)的增大,浆液凝结时间增长。在南京纬三路过江通道工程中,陈喜坤等^[7-8]将其粉细砂地层的渣土过筛处理后,部分代替商品砂配制同步注浆浆液,发现随渣土细度模数的增加,浆液凝结时间增长,但是在一定范围内可以满足工程要求。李雪等^[9]将粉细砂地层中不同地段的 3 种不同盾构渣土用于替换同步注浆浆液中的商品砂,发现采用渣土替换商品砂所配制浆液的凝结时间普遍比原浆液的凝结时间长。此外,也有探讨利用黏土地层渣土^[10]和废弃泥浆^[11]代替部分膨润土和水等材料进行同步注浆浆液配制的研究,但是用量一般都比较少,且会导致浆液凝结时间明显增长,浆液后期强度显著减小。综上所述,工程中采用渣土配制同步注浆浆液方面的研究较多,且大多数是针对废弃粉细砂配制同步注浆浆液开展研究的,但凝结时间相比现场浆液有所延长。

本文依托南京和燕路过江通道工程,以泥水盾构穿越中风化角砾岩层所排出的岩渣替换一定比例的原同步注浆浆液中的商品砂,测试替换后的浆液流动性、凝结时间、强度等基本性质,探讨岩渣替换商品砂进行同步注浆浆液配制的可行性,并给出能够满足同步注浆要求的替换比例。

1 工程概况

南京和燕路过江通道位于长江大桥和长江二桥之间,距离上游的长江大桥约 7.4 km,距离下游的长江二桥约 2.7 km。和燕路过江通道工程采用隧道方案穿越长江右汊(主江),主线工程全长约 5.725 km,其中隧道盾构段为 YK1+732.209~YK4+708.589,长约 2976.38 m,采用 15.03 m 的超大直径泥水盾构机修建,隧道外径为 14.5 m,内径为 13.3 m。

盾构主要穿越强透水砂层、土-岩复合地层、全断面风化岩层(约 1 270 m,其中包含部分岩溶和断裂带)等多种复杂地层,进入全断面风化岩层后,将会产生大约 22.5 万 m³的岩渣。若按通常的外运弃置方式处理废弃岩渣,将造成一定的环境污染。盾构所排放的岩渣级配曲线如图 1 所示,从图 1 中可以看出岩渣粒径小于 2 mm 的颗粒占 90% 以上,颗粒级配较好,可以用于配制同步注浆浆液,对此开展废弃岩渣替换商品砂配制同步注浆浆液的研究。将岩渣用于配制同步注浆浆液不仅能够节省商品砂的购买费用,还可以解决岩渣堆放带来的环境问题。

2 试验设计

2.1 试验材料

岩渣替换商品砂的同步注浆试验,采用以水泥、粉煤灰、商品砂、岩渣、水和添加剂(减水剂)为原材料的可硬性活性浆液进行注浆。同步注浆所用细砂经过洗砂、烘干后进行室内试验,水泥为海螺水泥厂 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,粉煤灰为南京扬子粉煤灰公司生产的 F 类Ⅱ级粉煤灰,减水剂为江苏苏博特新材料公司 PCA-I 聚羧酸减水剂,膨润土以蒙脱石为主要成分。

本试验所用岩渣为盾构穿越中风化角砾岩地层施工产生的,地层中角砾岩呈紫红色夹灰白色,角砾状构造,以钙质胶结为主。

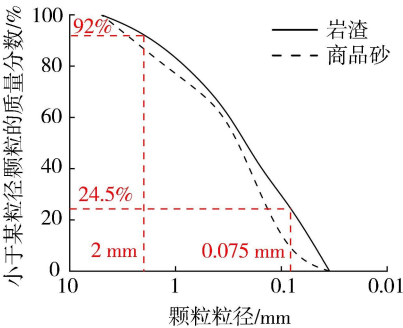


图 1 级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

角砾成分主要为砂岩、灰岩等,灰岩质量分数约为 30% ~ 50%。盾构机掘经此地层排出的废弃泥砂经旋流、振筛后得到岩渣,含水率 $\omega_{\text{渣}} = 23.45\%$ 。岩渣级配曲线如图 1 所示,岩渣不均匀系数 $C_u = 6.2$, 曲率 $C_c = 0.69$, 粒径小于 0.075 mm 的粉粒质量分数为 24.5%, 即含泥率 $\varphi = 24.5\%$ 。

2.2 试验装置和方法

为满足浆液在施工中的泵送能力、稳定性和注入空隙后尽快固结硬化等要求,需要测定浆液流动度、稠度、泌水率、凝结时间和抗压强度。

同步注浆材料的抗压强度、稠度和凝结时间参考 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[12] 进行试验,流动度参考 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》^[13],泌水率测定参考 GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[14] 以及 T/CECS 563—2018《盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程》^[15]。图 2 是同步注浆浆液性能测试仪器,主要包括稠度仪、砂浆流动度测定仪、路面材料强度测试仪、量筒、凝结时间测定仪等。

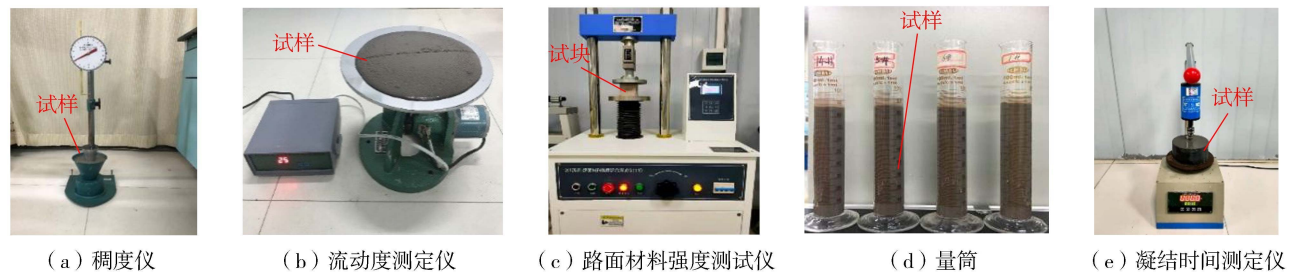


图 2 同步注浆浆液性能测试仪器

Fig. 2 Performance test instruments of synchronous grouting slurry

2.3 试验方案

按照盾构隧道现场同步注浆材料及配比进行试验,测试浆液流动度、稠度、凝结时间、泌水率、抗压强度等各项性能参数,现场同步注浆浆液配比:水泥 260 g、粉煤灰 190 g、砂 1 100 g、水 340 g、膨胀土 80 g、减水剂 8 g。

为满足盾构同步注浆的目的和施工工艺要求,同步注浆浆液需满足强度、流动性、凝结时间、泌水率和抗压强度等要求。根据工程地质条件、周边情况、注浆情况和工程经验等,同步注浆浆液的流动度、稠度、凝结时间、泌水率和抗压强度等一般需要满足的性能指标见表 1^[6,16-19]。

岩渣替换商品砂配制同步注浆浆液试验在现场原始同步注浆配比的基础上,不计算岩渣中泥(粒径小于 0.075 mm)的含量,将岩渣等质量替换原浆液中的商品砂和水,然后测试不同替换比例(替换比例为 10% ~ 100%, 每组试验岩渣替换比例间隔 10%)浆液的性能。由于岩渣中的含泥量较高,使用其替换商品砂会增加浆液中的泥含量,从而导致浆液吸水性增加、流动性降低,因此将本试验中基于废弃岩渣配制的浆液的用水量均增加至 510 g。岩渣替换量计算公式为

$$m_{\text{渣}} = m_{\text{砂}}(1 + \omega_{\text{渣}})/(1 - \varphi)$$

(1)

式中: $m_{\text{渣}}$ 为岩渣质量; $m_{\text{砂}}$ 为商品砂质量。

3 试验结果与分析

3.1 流动性

流动度和稠度是衡量浆液泵送能力的指标^[20],当流动度、稠度较小时,注浆所需压力增大,不利于浆液在注浆管道内的泵送。流动度和稠度与替换比例的关系如图 3 所示,由于使用岩渣替换商品砂试验配比相对于现场配比增加了用水量,水胶比增大,因此岩渣替换比例为 10% 时的流动度和稠度比现场浆液有所增大。但随着替换比例逐渐增大,浆液中含泥量逐渐增加,流动度、稠度呈下降趋势,根据工程要求,流动度应大于 260 mm,稠度在 10 ~ 13 cm,因此,替换比例在 30% ~ 85% 可以满足流动度和稠度指标。替换比例在 85% 的浆液的流动度为 260 mm、稠度为 11.8 cm,与现场浆液接近。

3.2 泌水率

同步注浆浆液泌水率是单位体积的浆液中固体颗粒下沉时与粒料分离所泌水体积的大小,是评价同步注浆浆液性能的重要参数之一,可以反映浆液的稳定性^[21]。泌水率越小,表示浆液越稳定,反之,浆液越不稳定,在注浆过程中越容易发生堵管现象,因此,同步注浆浆液的泌水率越小越好。

泌水率与替换比例关系如图4所示,由于使用岩渣替换商品砂试验相比现场浆液用水量增大,因此替换比例为10%时相对现场浆液泌水率大幅度增加。但随着替换比例增大,泌水率呈现下降趋势。随着替换比例增大,浆液中含泥量增多,浆液整体孔隙率降低,水不易排出,进而泌水率减小。替换比例大于50%时,泌水率小于3.5%,满足同步注浆浆液泌水率要求,为满足浆液泌水率指标,替换比例应在50%~100%。

3.3 凝结时间与抗压强度

从盾构机掘进到管片脱出盾尾后,隧道管片在一定长度范围内就像两端固定的弹簧梁:一端受到盾尾的约束不能上浮,另一端受到已凝固水泥砂浆固体的约束也不能上浮^[22]。如果管片脱出盾尾后(一般情况2环或3环),同步注浆浆液凝结时间过长,达不到一定的早期强度,隧道管片仍然可视浸泡在液体之中,在浮力的作用下必然会产生上浮现象。因此,凝结时间以及初期抗压强度对控制盾构隧道管片上浮具有十分重要的作用。

浆液的凝结时间和抗压强度受水胶比、胶砂比、替换比例与水泥占比等因素影响,从图5可以看出,随着替换比例增大,凝结时间缩短,替换比例为85%时,缩短至7.3 h;1 d抗压强度逐渐增大,3 d和7 d抗压强度在替换比例为10%~50%时有所减小,在60%~100%时增大。替换比例为85%时,1 d抗压强度为0.73 MPa,增强了近1倍;7 d抗压强度为2.26 MPa,略小于现场浆液。根据同步注浆要求,浆液凝结时间应在6~12 h范围内,1 d抗压强度大于或等于0.15 MPa,7 d抗压强度大于或等于0.5 MPa,因此替换商品砂各组浆液凝结时间、抗压强度均能满足施工要求。

综上所述,以岩渣替换商品砂进行同步注浆浆液配制,当替换比例在50%~85%时,浆液各项指标能够满足同步注浆浆液性能标准,替换比例越大,流动度、稠度越小,浆液泵送能力降低。替换比例越大,泌水率越小,浆液凝结时间越短,1 d抗压强度随替换比例增大而增大,7 d抗压强度随替换比例先减小后增大。相较于现场浆液性能,将岩渣替换商品砂进行同步注浆浆液配制,总用水量增多,但所得浆液凝结时间均比现场短,且1 d抗压强度均大于现场浆液。

4 讨 论

目前国内关于废弃渣土用于配制同步注浆浆液的研究,多是关于废弃粉细砂配制同步注浆浆液。将粉细砂地层盾构机所排出的渣土经过一定处理后用于配制同步注浆浆液,浆液凝结时间有所增加,且抗压强度略小于原浆液,通过调整配比,所制浆液各性质均能满足要求。本文采用盾构穿越中风化角砾岩层时排出的岩渣替换现场浆液中部分商品砂和水,随着替换比例增大,浆液凝结时间缩短、1 d抗压强度增大,有利于更好地控制盾构隧道管片的上浮。相比于粉细砂层渣土,替换效果更好,且所用岩渣不需经过进一步处理,可

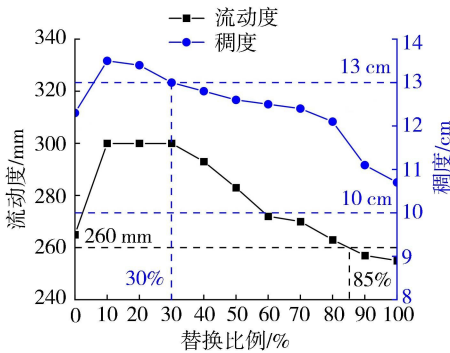


图3 替换比例与流动性的关系曲线

Fig.3 Relation curve of fluidity with replacing ratio of rock slag

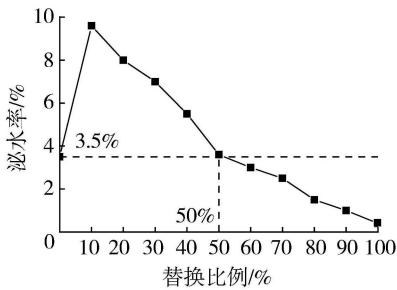


图4 替换比例与泌水率的关系曲线

Fig.4 Relation curve of bleeding rate with replacing ratio of rock slag

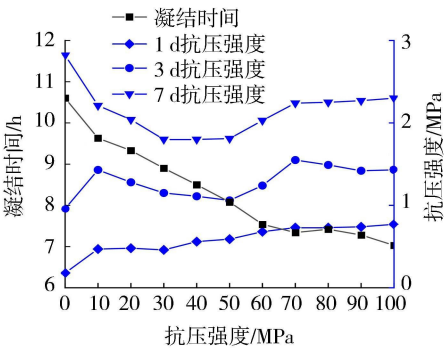


图5 替换比例与抗压强度及凝结时间的关系曲线

Fig.5 Relation curve of compressive strength and setting time with replacing ratio of rock slag

总用水量增多,但所得浆液凝结时间均比现场短,且1 d抗压强度均大于现场浆液。

直接用于配制同步注浆浆液,在一定的配比条件下,浆液各项性能均能满足施工要求。

针对图 5 中岩渣掺入后浆液凝结时间缩短和 1 d 抗压强度增大的现象,进行了 XRD 和 SEM 微观测试。由图 6 可知,岩渣中含有一定量的 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 相, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 属于高岭石,是一种黏土矿物,由长石、普通辉石等铝硅酸盐类矿物在风化过程中形成。 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 在水中会电解出 Al^{3+} , Al^{3+} 能够加速 $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (水化硅酸钙,简称 C-S-H) 凝胶的形成^[23]。C-S-H 凝胶是水泥水化的主要产物之一,其与另一水化产物 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 结晶(钙矾石,简称 AFt)相互搭接,填充于浆液的空隙之中,是浆液凝结后强度的主要来源。而商品砂的主要成分为二氧化硅,在浆液中主要起骨架作用,几乎对水泥水化反应没有影响。

由图 7 可知,各试样水化产物种类基本相同,均为 AFt、C-S-H 凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等,未掺入岩渣替换商品砂组试样中,生成 AFt 和 C-S-H 凝胶较少,水化程度较低,产物间搭接不密实,因此强度较低。相较于替换比例为 20% 和 50% 组,岩渣替换比例增大,C-S-H 凝胶量明显增多,AFt 结晶生成增多,各产物之间搭接更紧密,空隙较少,强度更高。

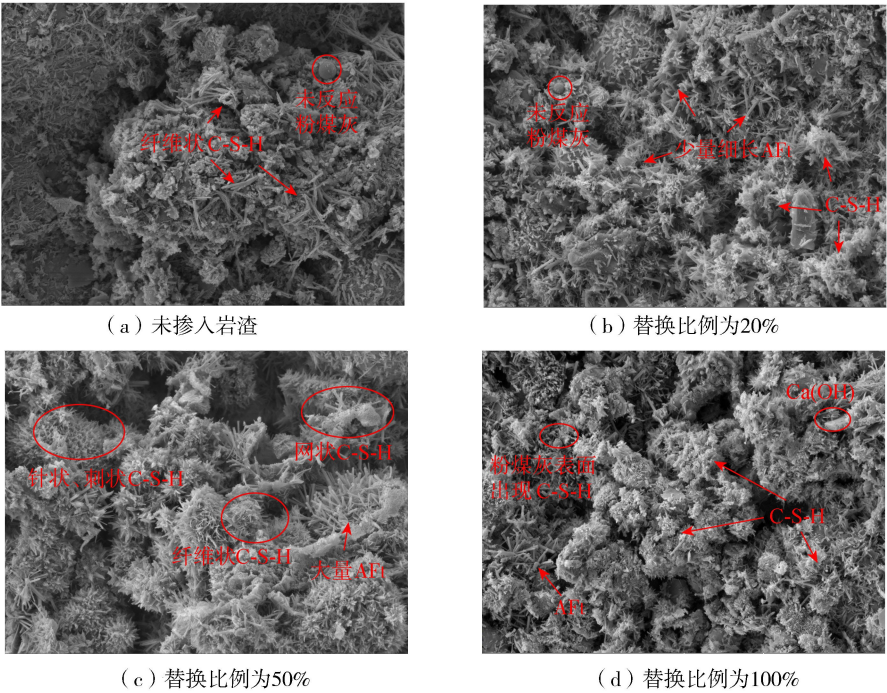


图 7 岩渣替换商品砂试样水化 1 d 的 SEM 图

Fig. 7 SEM of one-day hydration of rock slag replacing commercial sand sample

替换比例越大, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 越多,则其在水中电解出的 Al^{3+} 越多。 Al^{3+} 能够加速 C-S-H 凝胶的形成,C-S-H 凝胶增多,能与 AFt 结晶搭接更紧密,浆液空隙更少,因而浆液凝结时间缩短,1 d 抗压强度增大。这是浆液凝结时间缩短、强度提高的根本原因之一。和燕路过江隧道右线总掘进约 1 500 环,其中全断面风化岩层约 635 环。盾构机外径 $D=15.03\text{ m}$,隧道管片外径 $d=14.5\text{ m}$,环宽 $B=2\text{ m}$,注入率为 $\alpha=150\%$,则单环注入量 $V=\pi(D^2-d^2)B\alpha/4=36.87\text{ m}^3$ 。

按现用浆液配比中商品砂用量进行估算,商品砂单价为 150 ~ 200 元/t,若将全断面风化岩层约 635 环所排岩渣均用于配制同步注浆浆液,替换比例为 85%,不计岩渣处理费用、砂子运输费及人工费用,可节约成本约 380 万元。可见使用岩渣替换商品砂进行同步注浆材料制备具有较高的经济效益。

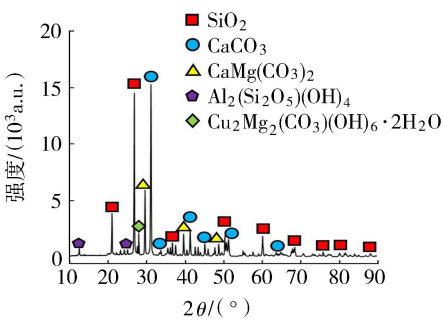


图 6 岩渣 XRD 图谱

Fig. 6 XRD pattern of rock slag

5 结 论

- a. 替换比例越大,流动度、稠度、泌水率、凝结时间越小;1 d 抗压强度随着替换比例增加而增强,而 7 d 抗压强度随替换比例增加先减小后增大;替换比例为 50% ~ 85% 时,浆液各项性能指标均能满足施工要求,说明使用岩渣替换同步注浆浆液中商品砂的可行性较高。
- b. 相对于粉细砂层渣土,使用风化岩层岩渣替换商品砂配制同步注浆浆液的最大优势在于能够使浆液凝结时间缩短。从岩渣 XRD 图谱中发现,岩渣替换商品砂配制的同步注浆浆液含有 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 相, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 在水中会电解出 Al^{3+} , Al^{3+} 能够促进浆液中 C-S-H 凝胶的形成, C-S-H 凝胶增多,能与 AFt 结晶搭接更紧密,浆液空隙更少,则浆液凝结时间缩短、1 d 抗压强度增大。
- c. 替换比例为 85% 时,浆液性能满足施工要求,且可最大限度地将岩渣再次利用,此替换比例下浆液流动度 260 mm、稠度 11.8 cm,与现场浆液接近;凝结时间为 7.3 h,缩短了约 30%;1 d 抗压强度为 0.73 MPa,增强了近 1 倍,7 d 抗压强度为 2.26 MPa,略小于现场浆液,但仍能满足施工要求。

参考文献:

[1] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34 (3): 179-187. (WANG Mengshu. Tunneling by TBM/shield in China: state-of-art, problems and proposals[J]. Tunnel Construction, 2014, 34 (3): 179-187. (in Chinese))

[2] 朱伟, 钱勇进, 王璐, 等. 长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (1): 138-149. (ZHU Wei, QIAN Yongjin, WANG Lu, et al. Main problems and development trends of long-distance shield tunneling [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (1): 138-149. (in Chinese))

[3] 洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设, 2015, 35 (2): 95-107. (HONG Kairong. State-of-art and prospect of tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (2): 95-107. (in Chinese))

[4] 叶治, 付岸然, 刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49 (3): 279-287. (YE Zhi, FU Anran, LIU Huabei. Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (3): 279-287. (in Chinese))

[5] 姜腾, 姚占虎, 闵凡路. 废弃黏土在泥水盾构泥浆配制中的再利用研究[J]. 隧道建设, 2014, 34 (12): 1148-1152. (JIANG Teng, YAO Zhanhu, MIN Fanlu. Study on cyclic use of waste clay in preparing slurry for slurry shield boring [J]. Tunnel Construction, 2014, 34 (12): 1148-1152. (in Chinese))

[6] 钟小春, 左佳, 刘泉维, 等. 地层中粉细砂在盾构壁后注浆中的再利用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29 (增刊 1): 293-296. (ZHONG Xiaochun, ZUO Jia, LIU Quanwei, et al. Reuse of excavated fine sand for back grouting of shield tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (Sup1): 293-296. (in Chinese))

[7] 陈喜坤, 朱伟, 王睿, 等. 南京纬三路过江通道弃砂在壁后注浆材料中的利用[J]. 隧道建设, 2015, 35 (11): 1176-1181. (CHEN Xikun, ZHU Wei, WANG Rui, et al. Utilization of abandoned sand in back wall grouting materials of Weisan road cross river passage in Nanjing[J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (11): 1176-1181. (in Chinese))

[8] 张亚洲, 夏鹏举, 魏代伟, 等. 南京纬三路过江通道泥水处理及全线路废弃土再利用技术[J]. 隧道建设, 2015, 35 (11): 1229-1233. (ZHANG Yazhou, XIA Pengju, WEI Daiwei, et al. Sludge treatment and waste soil reuse technology of Weisan road cross river passage in Nanjing[J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (11): 1229-1233. (in Chinese))

[9] 李雪, 黄琦, 王培鑫, 等. 粉细砂地层泥水盾构渣土回收利用及性能优化[J]. 建筑材料学报, 2019, 22 (2): 299-307. (LI Xue, HUANG Qi, WANG Peixin, et al. Recycling and performance optimization of slurry shield soil in silty sand stratum[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22 (2): 299-307. (in Chinese))

[10] 钱鑫, 管超, 陈一元, 等. 黏土地层土压平衡盾构渣土再利用同步注浆试验研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2 (1): 68-74. (QIAN Xin, GUAN Chao, CHEN Yiyuan, et al. Experimental study on synchronous grouting of earth pressure balance shield in clay stratum [J]. Tunnel and Underground Engineering Disaster Prevention, 2020, 2 (1): 68-74. (in Chinese))

[11] 杨钊, 贺祖浩, 吴克雄. 废弃泥浆在盾构壁后注浆中的应用[J]. 隧道建设, 2017, 37 (8): 985-989. (YANG Zhao, HE Zuhao, WU Kexiong. Application of waste slurry in grouting behind shield wall[J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (8): 985-989. (in Chinese))

[12] 陕西省建筑科学研究院. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水泥胶砂流动度测定方法: GB/T 2419—2005

[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准:GB/T 50080—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[15] 中国建筑科学研究院有限公司,南京易发新材料科技有限公司. 盾构法隧道同步注浆材料应用技术规:T/CECS 563—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[16] 肖立,张庆贺,赵天石,等. 泥水盾构同步注浆材料试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(1):59-64. (XIAO Li, ZHANG Qinghe, ZHAO Tianshi, et al. Experimental study on synchronous grouting material for slurry shield [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2011,7(1):59-64. (in Chinese))

[17] 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. (ZHOU Lin, MAO Wen, SHI Mohua. Optimization design of mix proportion of synchronous grouting slurry in shield tunnel [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013,35(9):29-33. (in Chinese))

[18] 徐建平,林文书,许可,等. 盾构隧道快硬高性能同步注浆材料研究[J]. 隧道建设,2014,34(2):95-100. (XU Jianping, LIN Wenshu, XU Ke, et al. Study on fast hardening and high performance synchronous grouting material for shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2014,34(2):95-100. (in Chinese))

[19] BEZUIJEN A, VAN DER ZON W H, TALMON A M. Labo-ratory testing of grout properties and their influence on backfill grouting[C]//Proceedings of 1TA-AITES World Tunnel Congress. Istanbul:[s. n.],2005:941-947.

[20] 王鹏. 盾构隧道壁后注浆体特性及其对地层变形的影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.

[21] 杨钊,贺祖浩,刘毅,等. 福州地铁过江通道泥水盾构弃浆在壁后注浆材料中的再利用[J]. 现代隧道技术,2019,56(3):192-199. (YANG Zhao, HE Zuhao, LIU Yi, et al. Reuse of slurry discarded by slurry shield in back wall grouting material of river crossing channel of Fuzhou Metro[J]. Modern Tunnel Technology, 2019,56(3):192-199. (in Chinese))

[22] 王旋东. 砂性土层盾构隧道管片上浮因素分析及控制技术[J]. 上海建设科技,2020(2):36-38. (WANG Xuandong. Factors analysis and control technology for segment floating of shield tunnel in sandy soil [J]. Shanghai Construction Science and Technology, 2020(2):36-38. (in Chinese))

[23] 丁向群,李欣,郭一哲,等. 三乙醇胺与硫酸铝对水泥凝结时间的影响研究[J]. 混凝土,2021(5):56-60. (DING Xiangqun, LI Xin, GUO Yizhe, et al. Effect of triethanolamine and aluminum sulfate on setting time of cement[J]. Concrete, 2021(5):56-60. (in Chinese))

(收稿日期:2022-07-28 编辑:刘晓艳)

(上接第 45 页)

[10] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS F T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, 54(3):157-163.

[11] YIN Z, HICHER P, DANO C, et al. Modeling mechanical behavior of very coarse granular materials[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 143(1):C4016006.

[12] ALTUHAFI F, O’SULLICAN C, CAVARRETTA I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, 139(8):1290-1307.

[13] 魏浩,沈超敏,刘斯宏,等. 考虑级配影响的粗粒料压缩破碎特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):182-188. (WEI Hao, SHEN Chaomin, LIU Sihong, et al. Experimental study on compression and crushing characteristics of coarse granular materials considering influence of gradations [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(2):182-188. (in Chinese))

[14] 于际都,刘斯宏,沈超敏,等. 染色石膏颗粒一维压缩破碎与形状演化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):110-116. (YU Jidu, LIU Sihong, SHEN Chaomin, et al. Breakage and shape evolution of dyed gypsum particles under one-dimensional compression[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(1):110-116. (in Chinese))

[15] 牛奕然,周健,赵程,等. 砂岩球形颗粒多点接触破碎试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):92-97. (NIU Yiran, ZHOU Jian, ZHAO Cheng, et al. Experimental study on multi-point contact crushing of spherical sandstone particles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(2):92-97. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-27 编辑:刘晓艳)