

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.020

水下不分散混凝土抗分散剂优化设计与凝结时间调控

刘祥胜¹, 纪厚祥¹, 郑圣彪², 詹炳根^{2,3,4}, 余其俊^{2,3,4}, 李占甫⁵

(1. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 水泥材料低碳技术与装备教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 4. 安徽省水泥材料低碳技术工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 5. 中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要:水下不分散混凝土(non-dispersible underwater concrete, NDC)为涉水工程的施工提供抗冲刷能力,为实现水下不分散混凝土性能的提升,文章探讨抗分散剂的优化设计和凝结时间的调控,选取聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)和羟丙基甲基纤维素(hydroxypropyl methyl cellulose, HPMC)作为抗分散剂主剂,聚羧酸减水剂、有机硅和聚醚类消泡剂作为辅剂,从抗分散性和流动性的角度对水下不分散混凝土抗分散剂的组成进行优化设计,同时选取碳酸锂和硫酸铝作为调凝剂,对水下不分散混凝土的凝剂时间进行调控。研究结果表明:采用HPMC作为主剂、聚羧酸减水剂和聚醚类消泡剂作为辅剂制备抗分散剂,可以使得水下不分散混凝土具有较好的抗分散性和流动性;其中,含水泥质量分数0.45%的HPMC和1%聚羧酸减水剂的新拌水泥砂浆(水胶质量比为0.5,胶砂质量比为2)表现出优异的抗分散性和良好的流动性,其pH值为9,扩展度为150 mm;在该体系中,硫酸铝的调凝效果较好且经济效益更高,但使用时用量应少于2%。对抗分散剂的优化设计和凝结时间的调控为水下不分散混凝土的相关实验研究提供了重要参考。

关键词:水下不分散混凝土(NDC);抗分散剂;减水剂;凝结时间

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)10-1427-07

Optimization design of anti-dispersant and setting time regulation for non-dispersible underwater concrete

LIU Xiangsheng¹, JI Houxiang¹, ZHENG Shengbiao²,
ZHAN Binggen^{2,3,4}, YU Qijun^{2,3,4}, LI Zhanfu⁵

(1. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Engineering Research Center of Low-carbon Technology and Equipment for Cement-based Materials of Ministry of Education, Hefei 230009, China; 4. Anhui Province Engineering Research Center of Low-carbon Technology for Cement-based Materials, Hefei 230009, China; 5. CCCSHEC Fourth Engineering Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: Non-dispersible underwater concrete (NDC) provides erosion resistance for the construction of wading projects. In order to improve the performance of NDC, the optimization design of anti-dispersant and the regulation of setting time were investigated. Polyacrylamide (PAM) and hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) were selected as the main anti-dispersants, and polycarboxylic acid water-reducing agent, silicone and polyether defoamer were selected as the auxiliary agents to optimize the design of NDC anti-dispersant from the perspective of anti-dispersion and flowability. Lithium carbonate and aluminum sulfate were selected as setting agents to regulate the setting time of NDC. The results show that the NDC anti-dispersant, which was prepared with HPMC as the main agent, polycarboxylic acid water-reducing agent and polyether defoamer as auxiliary agents, displays superior anti-

收稿日期:2023-01-17;修回日期:2023-03-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51972115);合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2020JSKF0615)

作者简介:刘祥胜(1971—),男,安徽合肥人,安徽省交通控股集团有限公司高级工程师;

詹炳根(1964—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: bgzhan@hfut.edu.cn;

余其俊(1962—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

dispersion and flowability. The fresh cement mortar(water-to-cement mass ratio is 0.5 and cement-to-sand mass ratio is 2) containing 0.45% HPMC and 1% polycarboxylic acid water-reducing agent by mass of cement shows excellent anti-dispersion and good flowability with a pH value of 9 and an extension of 150 mm. In this system, aluminum sulfate is more effective and economical in regulating the setting time, but the dosage should be less than 2%. This paper provides reference for experimental research related to NDC by optimizing the design of anti-dispersant and regulating the setting time.

Key words: non-dispersible underwater concrete(NDC); anti-dispersant; water-reducing agent; setting time

根据环境要求,跨海大桥、大型地下结构等日益增多,涉水部分的大直径超长灌注桩施工对水下不分散混凝土(non-dispersible underwater concrete, NDC)性能的要求不断提高。我国于 20 世纪 80 年代开始制定关于 NDC 主剂及其外加剂的相关规范^[1],发展至今 NDC 的抗分散性、工作性和力学性能依旧与发达国家存在差异。

抗分散剂是 NDC 制备的关键之一,由主剂和辅剂制成。其中主剂的作用原理是在新拌混凝土中形成絮凝结构,增加了体系的黏度,因此称为絮凝剂或增黏剂^[2],其掺入可避免新拌混凝土在水中浇筑时分散,常用的絮凝剂有纤维素醚(celulose ether, CE)和聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)。纤维素醚是源自纤维素的水溶性聚合物,在建筑领域中多用于增稠剂和保水剂^[3],其中羟丙基甲基纤维素(hydroxypropyl methyl cellulose, HPMC)不仅能吸附在水泥颗粒上,还能通过吸附溶液中的钙离子形成团聚甚至沉淀^[4],然而目前运用于工程实践中的相关研究较少。文献^[5]认为采用纤维素醚作为抗分散剂对 NDC 的强度更有利;文献^[6]对比了纤维素醚和聚丙烯酰胺对海工 NDC 性能的影响,结果表明纤维素醚对混凝土的流动度影响较小,但会导致缓凝,且引入了较多有害气孔使得抗渗性能变差,相对而言 PAM 对混凝土强度的提升较为明显,然而 PAM 还存在不同离子型对流动度影响差异明显,阳离子型对流动性不利^[7]的问题。

抗分散剂的辅剂包括减水剂和消泡剂等。减水剂是提高 NDC 流动性的重要组分,在混凝土中所使用的抗分散剂必须与减水剂有良好的相容性。文献^[8-9]认为纤维素系抗分散剂与三聚氰胺减水剂有良好的相容性,但会在混凝土中引入大量且不均匀的气泡;文献^[10]采用生物多聚糖型絮凝剂制备了 NDC,并研究了减水剂种类对其性能的影响,发现聚羧酸减水剂优于萘系和氨基磺酸系减水剂,其达到较好效果的掺量较低,而且

有利于 NDC 强度的发展。当砂浆中掺入纤维素醚时会产生大量气泡,最终会在砂浆中形成气孔使得强度及其耐久性降低,消泡剂的加入会使气泡表面变薄最终破裂从而提高砂浆强度^[11]。

上述文献关注 NDC 抗分散剂的配比及其与减水剂和消泡剂的适应性,然而在抗分散性能方面还存在不足,尤其是缺乏 PAM 和 HPMC 对抗分散性能的对比研究。此外,在实际施工过程中需要同时对混凝土的凝结时间进行调控,然而相关研究较少。

针对上述问题,本文选取 PAM 和 HPMC 作为抗分散剂主剂,聚羧酸减水剂、有机硅和聚醚类消泡剂作为辅剂,从抗分散性和流动性角度对抗分散剂组成进行优化设计,并选取碳酸锂和硫酸铝作为调凝剂,针对所配制的材料进行凝结时间调控。

1 原材料及实验方法

1.1 原材料及测试仪器

水泥采用 P·O42.5R(安徽海螺水泥厂);粉煤灰为 F 类 II 级灰(马鞍山正圆实业有限公司);S90 矿粉(马鞍山钢铁厂);硅灰(ELKEM 国际贸易有限公司);偏高岭土(辰义耐材磨料公司);细骨料河砂(江西赣江);粗骨料碎石,5~16 mm(泾县晏公采石场);HL-900 聚羧酸减水剂母液(湖南中岩建材科技有限公司);聚丙烯酰胺、消泡剂(广东百年宏图化工科技有限公司);抗分散主剂:PAM(晋州市富强精细化工有限公司)分子量分别为 8×10^6 、 10×10^6 、 12×10^6 、 14×10^6 , HPMC(晋州市富强精细化工有限公司)分子量分别为 10×10^4 、 15×10^4 、 20×10^4 、 25×10^4 。

力辰 WGZ-1A 台式浊度仪、昌吉 NDJ-8S 旋转黏度计、上海雷磁酸度计 PHS-25、东方化玻(北京)科技有限公司维卡仪。

1.2 实验方法

1) 抗分散剂主剂的优化。将 450 g 水泥、

180 g 水和水泥质量分数(简称为掺量)0.5%的聚羧酸减水剂搅拌,水灰质量比(简称为水灰比)为 0.4。掺入不同分子量和不同掺量 PAM 和 HPMC。PAM 分子量选取 8×10^6 、 10×10^6 、 12×10^6 、 14×10^6 , 简称为 AP80、AP100、AP120、AP140, 水泥掺量按照 0.5%~2.5% 逐步增加; HPMC 分子量选取 10×10^4 、 15×10^4 、 20×10^4 、 25×10^4 , 简称为 HPMC-10、HPMC-15、HPMC-20、HPMC-25, 水泥掺量按照 0.3%~0.6% 逐步增加。参考文献[12], 采用 NDJ-8S 旋转黏度计, 将净浆倒入 500 mL 烧杯中, 并使其高度介于 70~125 mm, 使液面标志(凹槽中部)和液面相平, 开启仪器进行测试程序。测试程序完成后 30 s 时的稳定数据作为浆体的表观黏度 η 。参考文献[13], 在 1 L 烧杯中装入 800 mL 清水, 量取水泥浆液 100 mL, 将浆液从水面缓慢倒入水中后, 静置 3 min 后吸取上层 100 mL 液体, 采用力辰 WGZ-1A 台式浊度仪和上海雷磁酸度计 PHS-25 测试浊度和 pH 值, 用于表征水泥净浆抗分散性。扩展度、流动度参考文献[14]。

2) 抗分散剂辅剂的优化。减水剂的优化选取 2 组相同水泥净浆(由 450 g 水泥和 180 g 水制备)分别掺入 PAM(分子量 8×10^6 , 水泥掺量为 1.0%)和 HPMC(分子量 15×10^4 , 水泥掺量为 0.4%)。掺入聚羧酸减水剂(0.5%~2.0% 掺量逐步增加), 测试水泥浆体的 pH 值和浑浊度, 用于表征水泥净浆抗分散性。参考文献[14]测得水泥净浆扩展度。

消泡剂的优化采用 450 g 水泥、225 g 水、225 g 砂(水胶质量比 0.5, 简称为水胶比; 胶砂质量比 2, 简称为胶砂比), 聚羧酸减水剂掺量为水泥的 1.00%、HPMC 掺量为水泥的 0.45%, 先干拌 15 s, 再加减水剂和水慢搅 2 min 后快搅 3 min 制备砂浆。消泡剂选用有机硅系列和聚醚系列, 掺量为 0~1.5%, 参考文献[12]测试砂浆扩展度。在 30 cm 水下用 40 mm×40 mm×160 mm 三联试模成型, 制备砂浆试块。养护 7、28 d 后参考文献[15]测定强度。

3) 由 450 g 水泥、50 g 粉煤灰、200 g 水(水胶比 0.4)制备水泥净浆, 聚羧酸减水剂掺量为胶凝材料的 1.20%、HPMC-15 掺量为胶凝材料的 0.55%。分别按照胶凝材料质量分数 2%~6% 逐步掺入硫酸铝和碳酸锂。参考文献[16]测试水泥浆体凝结时间, 参考文献[14]测试水泥浆体扩展度。

2 结果与讨论

2.1 主剂对材料流变性能和抗分散性的影响

2.1.1 絮凝剂对水泥浆体流变参数的影响

不同掺量抗分散剂主剂 PAM 和 HPMC 制备的新拌水泥净浆的黏度如图 1 所示。

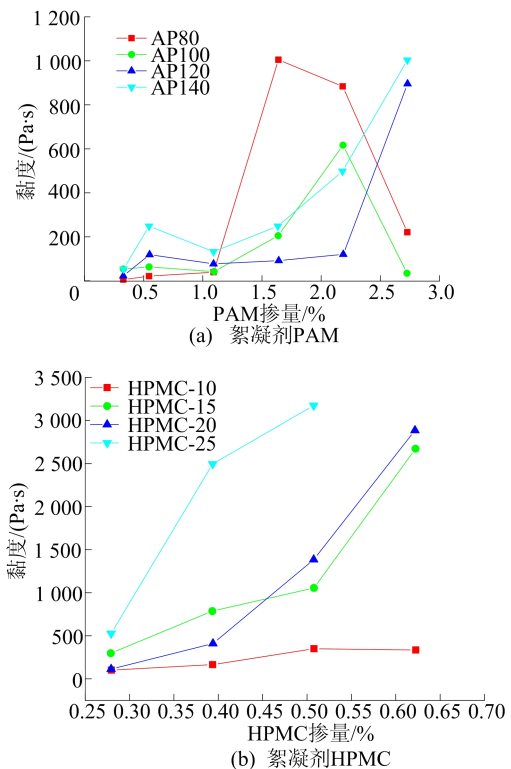


图 1 不同分子量和掺量絮凝剂水泥净浆的黏度

从图 1 可以看出, PAM 和 HPMC 均有较好的增黏作用。相对而言, PAM 能在更大的范围内调节黏度, 在掺量低于 1.0% 时, PAM 水泥浆体的黏度变化不大, 仅分子量最高的 AP140 水泥浆体表现出较大的黏度。PAM 掺量在 0~1.0% 的区间内, 浆体的黏度在 PAM 掺量为 0.5% 处达到峰值, AP140、AP120、AP100、AP80 的黏度分别为 290、175、135、102 Pa·s, 整体呈现先上升后下降的趋势。在掺量超过 1.0% 后, PAM 的黏度均会在某个区域内开始急剧增加达到局部最大, 随着掺量继续增大后黏度反而会减小。若 PAM 的分子量越大, 则极大值出现的掺量越大, 如 AP80 的极大值在 1.5% 处出现, 而 AP100 的极大值在 2.0% 处出现, AP120 和 AP140 的极大值则不在试验的掺量范围内。

2.1.2 絮凝剂水泥浆体抗分散性能的影响

不同分子量和掺量 PAM 絮凝剂制备的新拌水泥净浆的 pH 值、浑浊度如图 2 所示。

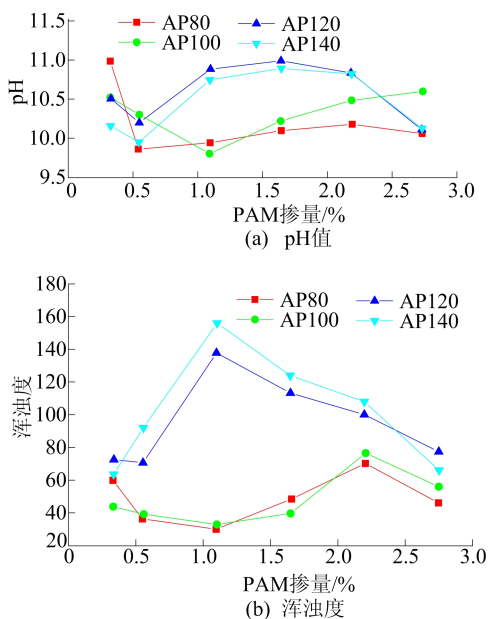


图 2 不同分子量和掺量 PAM 水泥净浆的 pH 值、浑浊度

由图 2 可知, PAM 在较低的掺量 (小于 1.0%), 水泥浆体 pH 值和浑浊度较低, 说明其能达到很好的抗分散效果。对于分子量不大于 10×10^6 的 PAM (AP80 和 AP100), 在掺量小于 1.0% 时, PAM 的掺量越大则抗分散性越好。掺量大于 1.0% 后, 其 pH 值和浑浊度的变化明显受黏度变化的影响较大。对于分子量大于 10×10^6 的 PAM (AP120 和 AP140), 其 pH 值和浑浊度先增大后减小, 浑浊度在 1.0% 处达到极值后不断减小。

不同分子量和掺量 HPMC 絮凝剂制备的水泥浆体 pH 值、浑浊度如图 3 所示。

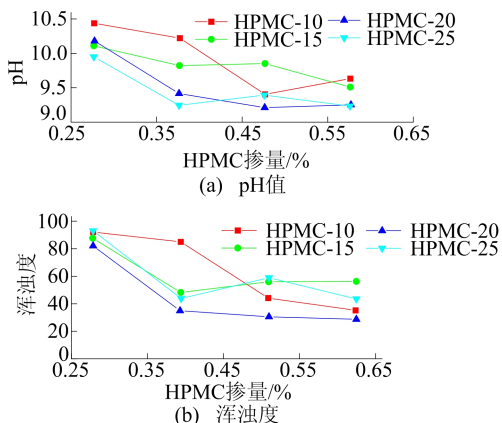


图 3 不同分子量和掺量 HPMC 水泥净浆的 pH 值和浑浊度

在掺量为 0.30% 时 HPMC-15 的 pH 值为 10.1, 浑浊度为 80。在掺量 0.60% 时, pH 值减少到 9.5, 浑浊度减少到 49。HPMC 分子量为

10×10^4 、 20×10^4 、 25×10^4 也是相同趋势, 可以看出 HPMC 的掺量越大, 抗分散性能越好。

2.1.3 絮凝剂对水泥浆体流动性的影响

不同分子量和掺量 PAM 絮凝剂制备的新拌水泥净浆扩展度、流动度如图 4 所示。

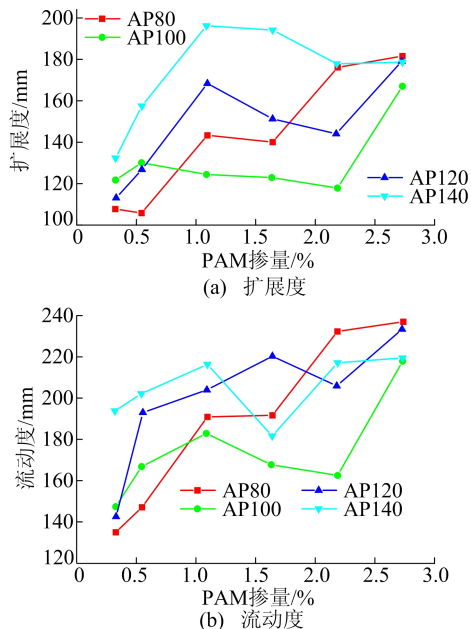


图 4 不同分子量和掺量 PAM 水泥净浆的扩展度、流动度

黏度与流动性能有直接的关系, 絮凝剂的增黏作用对净浆的流动性不利, PAM 的掺量越大, 浆体的流动性也越大, 但在黏度急剧增加的区间 (PAM 掺量为 1.0%~2.0%) 流动性的增加会受到较大影响甚至使流动性降低。不同分子量和掺量 HPMC 对新拌水泥净浆扩展度的影响如图 5 所示。HPMC 对新拌水泥净浆流动性影响极大, HPMC 的掺量越大, 流动性越差。

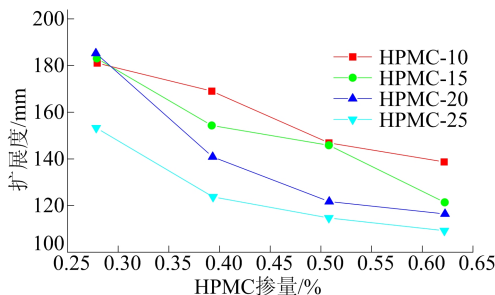


图 5 不同分子量和掺量 HPMC 水泥净浆的扩展度

2.1.4 抗分散剂主剂对减水剂的适应性

对比分析 PAM 和 HPMC 对聚羧酸减水剂的适用性, 不同聚羧酸掺量对 PAM (AP80 掺量 1.0%) 和 HPMC (HPMC-15 掺量 0.50%) 体系水

泥浆体扩展度、pH 值、浑浊度的影响如图 6 所示。

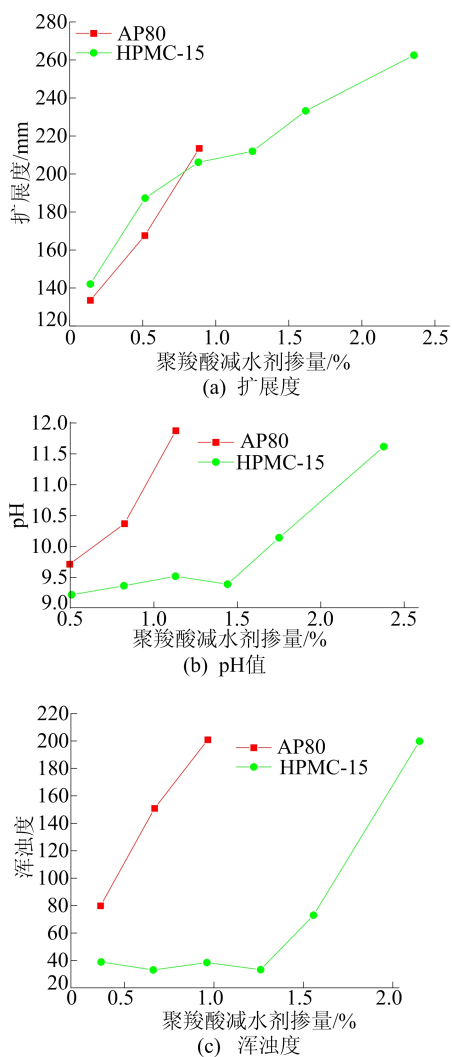


图 6 加入 AP80 或 HPMC-15 水泥浆体扩展度、pH 值和浑浊度

从图 6 可以看出,在掺量范围内聚羧酸减水剂能大幅度调节浆体的流动性,其中在掺量达到 1.0%后,掺 PAM 的水泥净浆已经失去抗分散能力。而掺 HPMC 的水泥净浆,直到聚羧酸减水剂掺量达到 2.0%才失去抗分散能力。聚羧酸减水剂对 PAM 水泥浆体中水泥颗粒的分散较强,随着聚羧酸减水剂掺量的增大,其抗分散性迅速下降。当聚羧酸减水剂的掺量小于 1.5%时,其掺量对含 HPMC 的水泥净浆的抗分散性影响较小,抗分散性能较为稳定,而聚羧酸减水剂的掺量超过 1.5%后,抗分散性随掺量的增大而急剧降低。HPMC 与聚羧酸减水剂匹配性较好,当聚羧酸减水剂的掺量较低时可以调节浆体的流动性而不损失抗分散性能。

2.2 抗分散剂对消泡剂的适应性

在制备 NDC 过程中发现,HPMC 和聚羧酸

减水剂的掺入会引入大量的气泡,有必要针对性地在抗分散砂浆中掺入消泡剂以减少砂浆试件中的有害孔,提高材料的强度。因此对有机硅消泡剂和聚醚类 6016 消泡剂进行实验比选。

不同掺量有机硅和聚醚类 6016 消泡剂制备的新拌水泥净浆扩展度和抗压强度如图 7 所示。从图 7 可以看出,有机硅类和聚醚类 6016 消泡剂的掺量越大,水泥净浆扩展度越大。相对而言,聚醚类 6016 消泡剂仅需较小的掺量就能达到较好的效果。2 种消泡剂均能产生显著的提升强度的效果,但是若想达到相同的效果,有机硅类消泡剂所需掺量较大。

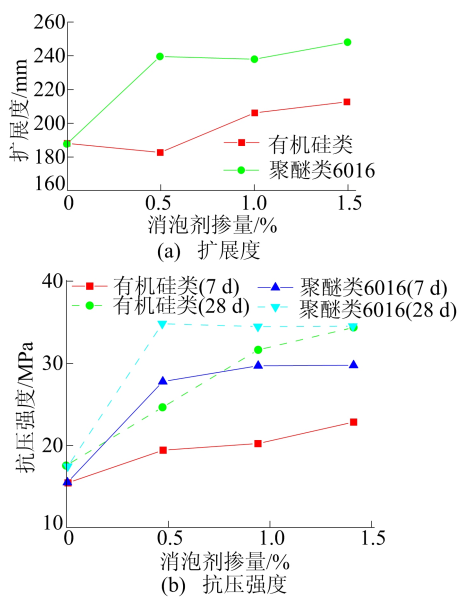


图 7 不同种类消泡剂掺量水泥净浆扩展度和抗压强度

2.3 NDC 凝结时间的调控

在制备 NDC 过程中发现,絮凝剂 HPMC 与聚羧酸减水剂共同使用会产生较强的缓凝效果。文献[2]研究表明各类型絮凝剂将导致混凝土缓凝数小时到数十小时不等,凝结时间过长将导致护壁浇筑后需长时间的等待才能进行下一步清孔,这会大大降低施工效率。

HPMC 是一种纤维素醚,其吸附在水泥上之后,其在水泥表面的吸附层可以隔离水与水泥矿物的接触,会延缓水泥颗粒的水化。这种缓凝作用与 HPMC 分子量的相关性较小,与其甲氧基的含量有较大的联系^[17]。文献[18]研究表明,当石膏与 C_3A 反应完全之后,纤维素醚将显著减缓 C_3A 溶解和水化铝酸钙 (calcium hydroaluminates) 沉淀。而对于 C_3S ,纤维素醚和减水剂对其生长速率影响较大,这 2 种聚合物均能降低其

生长过程中的活化能^[19]。在水泥水化初期聚羧酸系减水剂会有效抑制 C_3A 和 C_3S 的水化^[20], 纤维素醚也会显著减缓 C_3A 的溶解, 它们所形成的稳定吸附结构也会延缓水泥的水化反应。

根据文献^[21]的研究, 在无机盐类早强剂中选取硫酸钠、硝酸钠、石膏和碳酸锂。在有机化合物类中常用的有甲酸钙和三乙醇胺(TEA), 在前期试配过程中发现, TEA 的加入会使得浆体的流动性迅速降低, 且 TEA 在不同掺量下表现出对凝结时间的影响大相径庭^[18], 因此仅选用甲酸钙而不选用 TEA。

前期实验表明硫酸钠和硝酸钠的掺入能缩短初凝时间至 9.0 h 左右, 但无法进一步缩短凝结时间。石膏能显著缩短凝结时间, 但是初凝到终凝的过程中需间隔 4.0 h 左右。TEA 会使浆体迅速丧失流动性, 而甲酸钙的促凝效果较好。在掺入甲酸钙 2.5% 后, 初凝时间可缩短至 7.4 h, 但达到终凝还需间隔约 4.0 h。

除早强剂外, 在只重视早期凝结性、而后后期强度相对并不重要的工程中还常使用速凝剂。目前速凝剂主要向无碱或低碱发展, 本节选取文献^[22]中低碱粉状速凝剂的主要成分硫酸铝进行研究。不同硫酸铝掺量新拌水泥净浆的凝结时间和流动性如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 硫酸铝的掺量越大新拌水泥净浆的凝结时间越短, 当硫酸铝掺量达到 6% 时, 最短可在 3.1 h 达到终凝。这是由于在硫酸铝的解离所用下, 硫酸根与水泥中的钙反应生成大量的次生石膏, 使水化初期溶液中的硫酸根离子浓度骤增, 并与溶液中 Al_2O_3 、 $Ca(OH)_2$ 等组分迅速反应生成针柱状钙。同时, 硫酸铝的掺入超过 2% 后会显著降低浆体的流动性, 这可能与压缩双电层效应有关。因此, 为使材料有良好的流动性, 硫酸铝的掺量不宜超过 4%。

不同碳酸锂掺量下混凝土浆液凝结时间和流动性如图 9 所示。碳酸锂掺量超过 1.5% 后有较好的促凝效果, 当其掺量达到 2.5% 时可使初凝时间缩短到 5.8 h, 但在此基础上继续增加掺量则无法进一步明显缩短凝结时间。 Li^+ 能突破由聚羧酸系减水剂和 CE 形成的吸附层, 加速水化反应, 从而使凝结时间缩短^[11]。同时, 掺入适量的碳酸锂能略微提高浆体的流动度, 提高其掺量也不会使流动度损失过大。因此, 从促凝性能和改善流动性方面来看, 碳酸锂是理想的调凝组分。

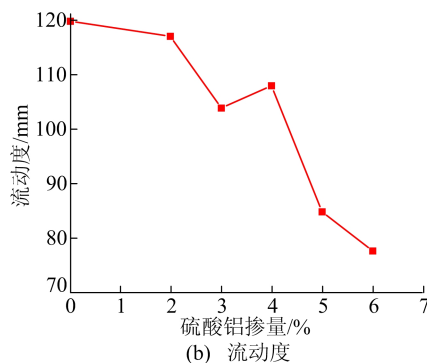
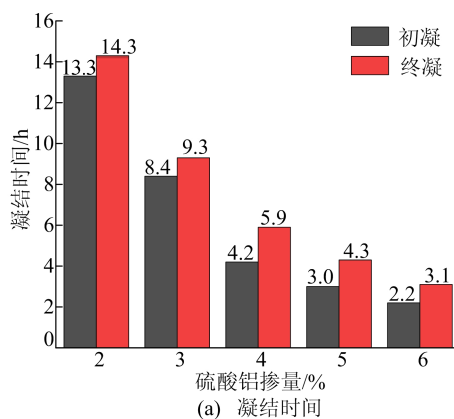


图 8 不同硫酸铝掺量下混凝土浆液凝结时间和流动度

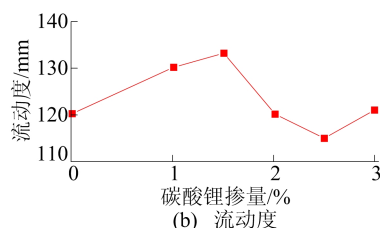
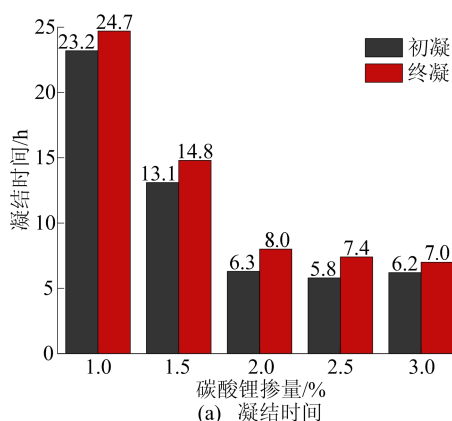


图 9 不同碳酸锂掺量下混凝土浆液凝结时间和流动度

3 结 论

1) 掺入 PAM 水泥净浆的表观黏度随其掺量的增加, 其峰值的出现时间也在变化(AP80 在掺量为 1.5% 时出现, AP100 在掺量为 2.0% 时出现)。当掺量大于 1.0% 时其浑浊度的变化明显受黏度变化的影响较大(AP140 浑浊度为 160,

AP80 浑浊度为 32),同时在这个掺量区间内,PAM 的掺量增多会影响甚至降低水泥净浆流动性(API20 在掺量为 1.0%时扩展度为 170,掺量为 1.5%时扩展度为 152),且当聚羧酸减水剂掺量大于 1%时,掺入 PAM 水泥净浆就已失去抗分散能力。

2) 掺入 HPMC 水泥净浆的黏度随其掺量的增加而增加,同时其抗分散性能也表现出相同特性,但 HPMC 对新拌水泥净浆流动性影响极大,HPMC 掺量越大,流动性越差(HPMC-15 在掺量为 0.63%时扩展度降至 126 mm)但其与聚羧酸减水剂适应性良好,在聚羧酸减水剂掺量达到 2.0%才失去抗分散能力。因此选择掺量为 0.50%的 HPMC-15 作为主剂掺量、1.0%的聚羧酸减水剂为辅助剂制作 NDC(水胶比为 0.5,胶砂比为 2)。

3) 有机硅消泡剂和聚醚类 6016 消泡剂 2 种消泡剂均能提高砂浆的扩展度,其中有机硅类消泡剂的掺量需要达到 0.5%后流动性才随掺量增大而增大,而聚醚类 6016 消泡剂仅需 0.5%的掺量其扩展度就能达到 240 mm。且对于强度有机硅类 7 d 强度即可达到 27 MPa,因此选择聚醚类 6016 消泡剂掺量为 0.3%作为材料的组分更加合适,其用于本体系中能起到良好的消泡效果。

4) 针对抗分散剂易产生的缓凝效果,选取碳酸锂和硫酸铝对新拌水泥净浆调凝,结果显示硫酸铝的调凝效果更好,而且使用成本较低,但在使用时需要控制用量在 2%以下,以免造成流动性损失过大,碳酸锂对浆体的流动性较为有利,但使用成本过高。

[参 考 文 献]

- [1] 孙振平,蒋正武,吴慧华.水下抗分散混凝土性能的研究[J].建筑材料学报,2006,6(3):279-284.
- [2] 宋作宝.混凝土增黏剂的研究[D].北京:北京工业大学,2003.
- [3] EBNEAJJAD S, LANDROCK A H. Chapter 5-Characteristics of Adhesive Materials[M]//EBNEAJJAD S, LANDROCK A H. Adhesives technology handbook, 3rd ed. Boston: William Andrew Publishing, 2015: 84-159.
- [4] YOU R, QIU Y, ZHANG P, et al. Research on the influence of different flocculants on concrete performance[C]//2020 5th International Conference on Materials Science, Energy Technology and Environmental Engineering. [S. l. : s. n.], 2020, 17(5): 571-573.
- [5] 林宝玉,蔡跃波,单国良.水下不分散混凝土的研究和应用[J].水力发电学报,1995,34(3):22-33.
- [6] 逢博,周宗辉.纤维素醚和聚丙烯酰胺对海工水下混凝土性能的影响[C]//中国硅酸盐学会水泥分会第五届学术年会.柳州:中国硅酸盐学会,2014:256-259.
- [7] MA B, PENG Y, TAN H, et al. Effect of hydroxypropyl-methyl cellulose ether on rheology of cement paste plasticized by polycarboxylate superplasticizer[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160(7): 341-350.
- [8] MOON H, SHIN K. Frost attack resistance and steel bar corrosion of antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(1): 98-108.
- [9] MOON H Y, SHIN K J. Evaluation on steel bar corrosion embedded in antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 521-529.
- [10] 陈国新,杜志芹,杨日,等.聚羧酸系减水剂用于水下部分三混凝土的研究[J].混凝土,2012(2):117-118.
- [11] 杜野.抗分散注浆材料研发及其动水冲蚀特性研究[D].成都:成都理工大学,2020.
- [12] 中国电力企业联合会.水下不分散混凝土试验规程:DL/T 5117—2021[S].北京:中国电力出版社,2021:4.
- [13] 中国建筑材料科学研究院.水泥胶砂流动度测定方法:GB/T 2419—2005[S].北京:中国电力出版社,2005:3.
- [14] 中国建筑材料联合会.混凝土外加剂匀质性试验方法:GB/T 8077—2012[S].北京:中国电力出版社,2013:3-5.
- [15] 中国建筑材料科学研究院水泥科学与新型建筑材料研究所.水泥胶砂强度检验方法:GB/T 17671—1999[S].北京:中国电力出版社,1999:3.
- [16] 中国建筑材料科学研究院.水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法:GB/T 1346—2011[S].北京:中国标准出版社,2011:4-6.
- [17] POURCHEZ J, PESCHARDA, GROSSEAU P, et al. HPMC and HEMC influence on cement hydration[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(2): 288-294.
- [18] POURCHEZ J, GROSSEAU P, RUOT B. Current understanding of cellulose ethers impact on the hydration of C(3)A and C(3)A-sulphate systems[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(8): 664-669.
- [19] RIDI F, FRATINI E, ALFANI R, et al. Influence of acrylic superplasticizer and cellulose-ether on the kinetics of tricalcium silicate hydration reaction[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 395(8): 68-74.
- [20] 马保国,谭洪波,董荣珍,等.聚羧酸减水剂缓凝机理的研究[J].长江科学院院报,2008,25(6):93-95.
- [21] 叶飞,何彪,田崇明,等.三乙醇胺早强剂研究进展及在隧道工程中的应用展望[J].现代隧道技术,2020,58(4):67-78.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土外加剂应用技术规范:GB50119—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:26.

(责任编辑 张 镛)