

文章编号:1007-9629(2023)06-0678-09

# 聚合物对水下 3D 打印建筑砂浆性能的影响

杨钱荣<sup>1,2,\*</sup>, 邢昌祥<sup>2</sup>, 赵宗志<sup>2</sup>, 蒋正武<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

**摘要:**研究了乳胶粉、纤维素醚、淀粉醚掺量对水下 3D 打印建筑砂浆(3DP-BM)流变性能、工作性能、抗分散性能以及力学性能的影响. 结果表明:未掺乳胶粉或纤维素醚,以及淀粉醚掺量过高都会导致 3DP-BM 无法在水下进行打印;同时掺加乳胶粉、纤维素醚和淀粉醚,3DP-BM 具有良好的工作性能、适宜的力学强度和水下抗分散性能;当乳胶粉掺量为 0.500%、纤维素醚掺量为 0.100%、淀粉醚掺量为 0.025% 时,3DP-BM 具有适宜的可操作时间,良好的水下抗分散性能,以及较高的水下强度和下水堆积高度.

**关键词:**3D 打印;聚合物;水下;性能

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.014

## Effect of Polymers on Performance of Underwater 3D Printing Building Mortar

YANG Qianrong<sup>1,2,\*</sup>, XING Changxiang<sup>2</sup>, ZHAO Zongzhi<sup>2</sup>, JIANG Zhengwu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The effects of latex powder (FX), cellulose ether (HM) and starch ether (KH) on rheological properties, working properties, anti-dispersant properties and mechanical properties of underwater 3D printing building mortar (3DP-BM) were studied. The results show that 3DP-BM cannot be printed underwater without FX or HM, or with too much KH. Mixed with FX, HM and KH together, 3DP-BM has good working performance, appropriate mechanical strength and underwater anti-dispersion performance. When the content of FX, HM and KH is 0.500%, 0.100% and 0.025% respectively, 3DP-BM has suitable operational time, good underwater anti-dispersion property, and high underwater strength and underwater stacking height.

**Key words:** 3D printing; polymer; underwater; performance

随着人类活动空间的不断拓展,人们的生产活动范围由陆地逐渐扩展至浅海乃至深海.开发利用海洋资源以及建造各种水下功能性建筑<sup>[1-3]</sup>,都离不开水下建筑施工技术的不断发展和完善.

传统水下施工方法存在造价高、工期长、施工难度大等诸多问题<sup>[4-6]</sup>,以 3D 打印为核心的水下智能建造技术可以为上述问题提供解决方案.随着 3D 打印建筑技术的发展,国内外开始出现关于水下 3D 打印

混凝土的报道<sup>[7]</sup>.Mazhoud 等<sup>[8]</sup>通过添加纤维素醚减少了水下打印砂浆的孔隙率与渗透率,增强了其抗冲击性能,但随着打印速度的增加,其力学性能逐渐降低.Li 等<sup>[9]</sup>利用海水与珊瑚沉积物在偏远地区实现了水下 3D 打印,发挥了 3D 打印技术快速、免模板施工、节约劳动力与材料成本的特有优势,但同时打印成型的砂浆也存在力学性能差等缺点.因此,为满足水下特殊的施工环境,亟须进一步研究水下 3D 打印

收稿日期:2022-07-20; 修订日期:2022-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878480,52078369)

第一作者(通讯作者):杨钱荣(1965—),男,上海人,同济大学副研究员,硕士生导师,博士. E-mail:qyang@tongji.edu.cn

砂浆及混凝土的各项性能。

课题组前期研究了抗分散剂对水下3D打印建筑砂浆(3DP-BM)性能的影响,选用合适的抗分散剂,通过配合比优化设计,制备出了满足水下施工要求的3DP-BM<sup>[10]</sup>。本文进一步研究乳胶粉(FX)、纤维素醚(HM)和淀粉醚(KH)3种聚合物对水下3DP-BM流变性能、工作性能、抗分散性能及力学性能的影响,为水下3D打印砂浆及混凝土的设计与应用提供技术依据。

## 1 试验

### 1.1 原材料和配合比

水泥采用太仓海螺水泥有限公司生产的P·II 52.5硅酸盐水泥,其28 d抗折强度和抗压强度分别为10.8、53.2 MPa;矿粉采用上海宝田新型建筑材料有限公司提供的S105矿粉,其需水量比<sup>1)</sup>为96%,

28 d活性指数为107%;硅灰由上海天恺硅粉有限公司提供,其SiO<sub>2</sub>含量为87%,平均粒径为0.15~0.20 μm,比表面积为15 000~20 000 m<sup>2</sup>/kg,需水量比为115%,28 d活性指数为106%;减水剂采用巴斯夫Melflux系列白色粉末状聚羧酸减水剂;缓凝剂采用无色晶体状工业级柠檬酸;抗分散剂(UAD)由增稠剂、流化剂、凝结时间调节剂等复配自制而成;乳胶粉为醋酸乙烯酯/乙烯共聚可再分散乳胶粉;纤维素醚为白色粉末状羟丙基甲基纤维素,黏度为100 Pa·s;淀粉醚为白色粉末,黏度为800 mPa·s;骨料采用粒径为0.15~0.25 mm的石英砂。

表1为水下3DP-BM的基础配合比。水下3DP-BM主要由胶凝材料(水泥、矿粉、硅灰)、外加剂(减水剂、缓凝剂、抗分散剂、乳胶粉、纤维素醚、淀粉醚)及骨料等组分按一定质量比复合而成,外加剂掺量以胶凝材料的质量百分比计,水胶比为0.4,骨胶比为1.5。

表1 水下3DP-BM的基础配合比  
Table 1 Basic mix proportion of underwater 3DP-BM

									w/ %
Sample	Cement	Blast furnace slag	Silica fume	Water reducing admixture	Retarder	UAD	FX	HM	KH
R-0	85.000	10.000	5.000	0.300	0.060	2.000	0.500	0.100	0.025

通过改变基础配合比中3种聚合物的掺量(以砂浆质量计),制备9组水下3DP-BM试件,测试其各项性能。表2为9组水下3DP-BM中3种聚合物的掺量。

表2 9组水下3DP-BM中3种聚合物的掺量  
Table 2 The dosages of three types of polymers in nine groups of underwater 3DP-BM

w/%			
Sample	FX	HM	KH
A-1	0	0.100	0.025
A-2	1.000	0.100	0.025
A-3	2.000	0.100	0.025
B-1	0.500	0	0.025
B-2	0.500	0.200	0.025
B-3	0.500	0.300	0.025
C-1	0.500	0.100	0
C-2	0.500	0.100	0.050
C-3	0.500	0.100	0.100

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 基本物理力学性能

凝结时间参照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检测方法》进行测试。

抗折强度和抗压强度等性能参照GB/T 17671—

2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行测试。

#### 1.2.2 工作性能

参照文献[11]中的方法对水下3DP-BM的凝结时间、挤出性能、打印性能等进行测试。挤出性能为单位时间挤出材料的质量,该值越高,水下3DP-BM的挤出性能越好;打印性能包括水下和陆上堆积高度两方面;堆积高度为打印材料在一定变形度内的有效堆积高度,垂直方向的堆积高度越高,水下3DP-BM的堆积性能越好。

#### 1.2.3 抗分散性能

参照文献[10]中的方法测试水下3DP-BM在水环境中的质量损失率和周围环境水域pH值的变化,以表征其抗分散性能。质量损失率为浸水后与浸水前砂浆的质量之比;将500 g砂浆分成10份,从水面缓慢下落,静置3 min后记录自砂浆加入水中5、10、20、30 min时溶液的pH值,精确至0.01,pH值变化程度越小则砂浆的抗分散性能越好。

#### 1.2.4 流变性能

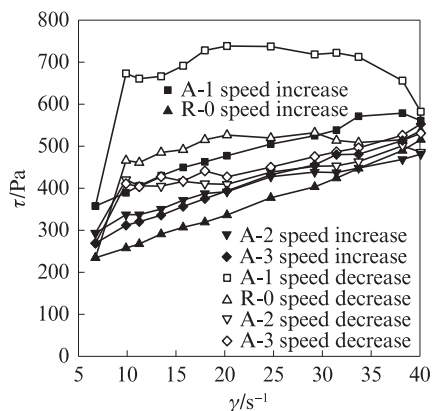
采用数字旋转黏度计对水下3DP-BM的流变参数进行测试。选择合适的转子和测试程序进行测试,可以直接得到砂浆的流变参数信息,再将转子转速由低到高逐渐增加,当显示屏显示转子达到最大转速后再逐渐降低,由此得到2条剪切曲线,计算2条

1) 文中涉及的需水量比、水胶比等除特别指明外均为质量分数或质量比。

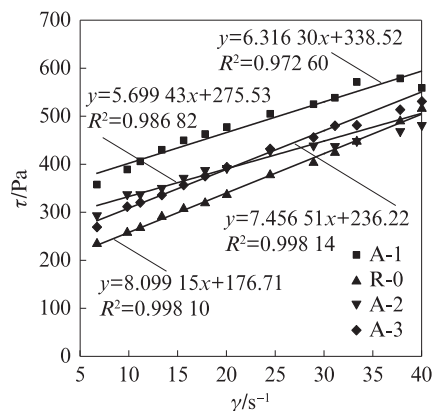
剪切曲线所围面积即可表征水下3DP-BM触变性的大小;通过对式(1)所示的Bingham流体模型中曲线的线性拟合,还能得到水下3DP-BM的临界剪切应力,即屈服应力( $\tau_0$ )与塑性黏度( $\eta$ )等信息.

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为剪切应力; $\gamma$ 为剪切速率.



(a) Thixotropic property



(b) Rheological characteristic

图1 乳胶粉掺量对水下3DP-BM触变性能和流变特性的影响

Fig. 1 Effect of FX content on thixotropic properties and rheological characteristics of underwater 3DP-BMs

图1(a)中的触变环面积反映了水下3DP-BM的触变性能.由图1(a)可见:未掺入乳胶粉时,水下3DP-BM的剪切曲线所围面积为6 517.09 Pa/s,其触变性能最强;掺入0.500%乳胶粉后,水下3DP-BM的剪切曲线所围面积为4 342.92 Pa/s,其触变性能显著降低;继续增加乳胶粉的掺量至1.000%、2.000%时,水下3DP-BM相应的剪切曲线所围面积为940.60、1 257.43 Pa/s,其触变性能表现为先减弱后逐渐增强;当乳胶粉掺量为1.000%时,水下3DP-BM的触变性能最小.水下3DP-BM的流变特性与Bingham流体模型的流变特性相符合.由图1(b)可见:当乳胶粉掺量为0%,0.500%,1.000%和2.000%时,水下3DP-BM对应的屈服应力分别为338.52、176.71、275.53、236.22 Pa,未掺乳胶粉的砂浆存在较大的屈服应力,掺入0.500%乳胶粉后屈服应力显著降低;随着乳胶粉掺量增加到1.000%,水下3DP-BM的屈服应力逐渐增大,继续加入乳胶粉掺量至2.000%时,屈服应力又有所下降;当乳胶粉掺量为0.500%时,水下3DP-BM的屈服应力最小.

掺入乳胶粉后,水下3DP-BM的触变性能和屈服应力都会显著降低,这是因为:乳胶粉颗粒的润滑作用减少了水下3DP-BM的团聚效应;乳胶粉对空气的诱导效应增加了水下3DP-BM的引气性,同时也改善了砂浆的和易性<sup>[12-13]</sup>.然而,当继续增加乳胶粉含量时,水下3DP-BM颗粒的稳定性会显著下降,从而降

## 2 结果与分析

### 2.1 乳胶粉掺量对水下3DP-BM性能的影响

#### 2.1.1 流变性能

图1为乳胶粉掺量对水下3DP-BM触变性能和流变特性的影响.

低其流变性能.此外,乳胶粉对水下3DP-BM还具有相当的增稠效果.因而,需要合理控制乳胶粉在水下3DP-BM中的掺量,以达到改善其流变性能的效果<sup>[14]</sup>.

#### 2.1.2 工作性能

图2为乳胶粉掺量对水下3DP-BM凝结时间、挤出性能和打印性能的影响.

由图2(a)可见,随着乳胶粉掺量的增加,水下3DP-BM的初凝时间和终凝时间都呈现逐渐增加的趋势,且在乳胶粉掺量增加到2.000%时,初凝时间和终凝时间达到最大值.研究表明<sup>[13]</sup>,乳胶粉颗粒具有延缓水泥水化进程的作用,因此,掺入乳胶粉后水下3DP-BM的凝结时间有所延长.由图2(b)可见:未掺乳胶粉的水下3DP-BM无法挤出;掺入0.500%的乳胶粉后,水下3DP-BM的挤出性能得到了明显改善;当乳胶粉掺量增至1.000%时,水下3DP-BM的挤出性能基本维持不变;当乳胶粉掺量进一步增至2.000%时,水下3DP-BM的挤出性能开始变差,这是由于此时打印砂浆的黏度和触变性能增加(见图1)所导致的.由图2(c)可见:未掺乳胶粉的3DP-BM由于流动性较差,难以泵送挤出,因而无法进行打印堆积;3DP-BM的陆上堆积高度随乳胶粉掺量的增加而增大,水下堆积高度与之相反,这是由于乳胶粉的缓凝作用不利于水下堆积,因此水下和陆上堆积高度呈现相反的变化趋势;当乳胶粉掺量为0.500%时,3DP-BM的水下和陆上堆积高度比最大.

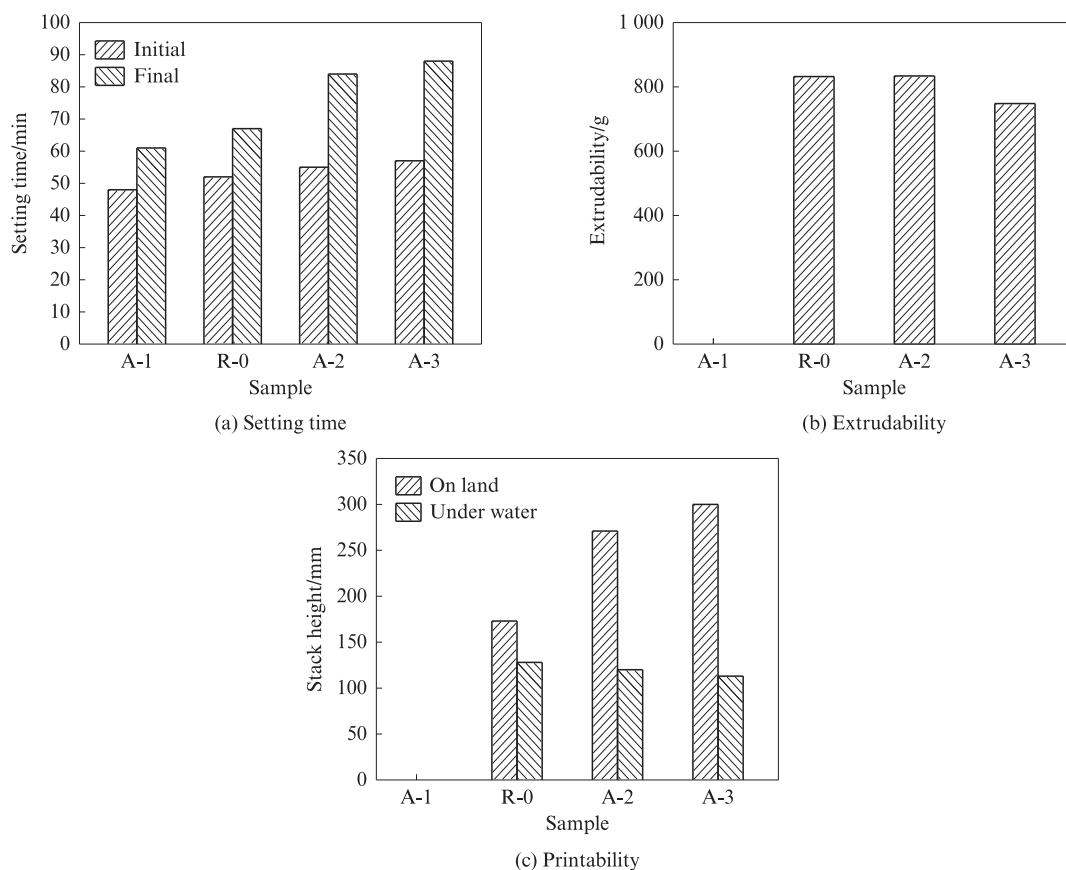


图2 乳胶粉掺量对水下3DP-BM凝结时间、挤出性能和打印性能的影响

Fig. 2 Effect of FX content on setting time, extrudability and printability of underwater 3DP-BMs

### 2.1.3 抗分散性能

表3为乳胶粉掺量对水下3DP-BM抗分散性能的影响。由表3可见:乳胶粉的掺入降低了水下3DP-BM的抗分散性能;随着乳胶粉掺量的逐渐加大,水下3DP-BM的质量损失率和浸水后溶液的pH值虽然在一定程度上有所降低,但数值上变化不大,对抗分散性能的影响较小。

表3 乳胶粉掺量对水下3DP-BM抗分散性能的影响

Table 3 Effect of FX content on dispersion resistance of underwater 3DP-BMs

Sample	Mass loss rate/%	pH value			
		5 min	10 min	20 min	30 min
A-1	1.4	9.96	9.97	10.01	10.03
R-0	0.5	9.84	9.86	9.87	9.89
A-2	0.7	9.84	9.89	9.91	9.92
A-3	0.3	9.61	9.66	9.70	9.77

未掺乳胶粉的打印砂浆,虽然其各项流变性能参数(屈服应力、塑性黏度和触变性能)均有所提高,但由于其在水中易发生团聚,各组分间相互作用的黏结力较弱,容易产生分散现象,因而抗分散性能较差;掺入乳胶粉后,水下3DP-BM颗粒的聚集状态得到改善,黏聚性得以加强,因而其抗分散性能有所增强。

### 2.1.4 力学性能

图3为乳胶粉掺量对水下3DP-BM力学性能的影响。由图3(a)可见:随乳胶粉掺量的增加,3DP-BM水、陆成型试件的3d抗折强度均有所增加;龄期的延长对不同乳胶粉掺量下3DP-BM的水、陆成型试件的抗折强度影响不大。由图3(b)可见,3DP-BM水、陆成型试件的抗压强度随乳胶粉掺量的增加逐渐降低,这可能是由于乳胶粉的引气作用增加了3DP-BM的总孔隙率和平均孔径<sup>[15]</sup>,导致其抗压强度有所降低。由此可见:乳胶粉掺量过高不利于提高水下3DP-BM的力学性能;适宜的乳胶粉掺量有利于3DP-BM水、陆成型试件抗折强度和抗压强度的提高,本试验适宜的乳胶粉掺量为0.500%。

## 2.2 纤维素醚掺量对水下3DP-BM性能的影响

### 2.2.1 流变性能

图4为纤维素醚掺量对水下3DP-BM触变性能和流变特性的影响。由图4(a)可见:当纤维素醚掺量为0%、0.100%、0.200%和0.300%时,水下3DP-BM的剪切曲线所围面积为1 230.29、4 342.92、5 375.36、5 710.33 Pa/s;与未掺纤维素醚的水下3DP-BM相比,0.100%纤维素醚的掺入显著增强了水下3DP-BM的触变性能;随着纤维素醚掺量的进一



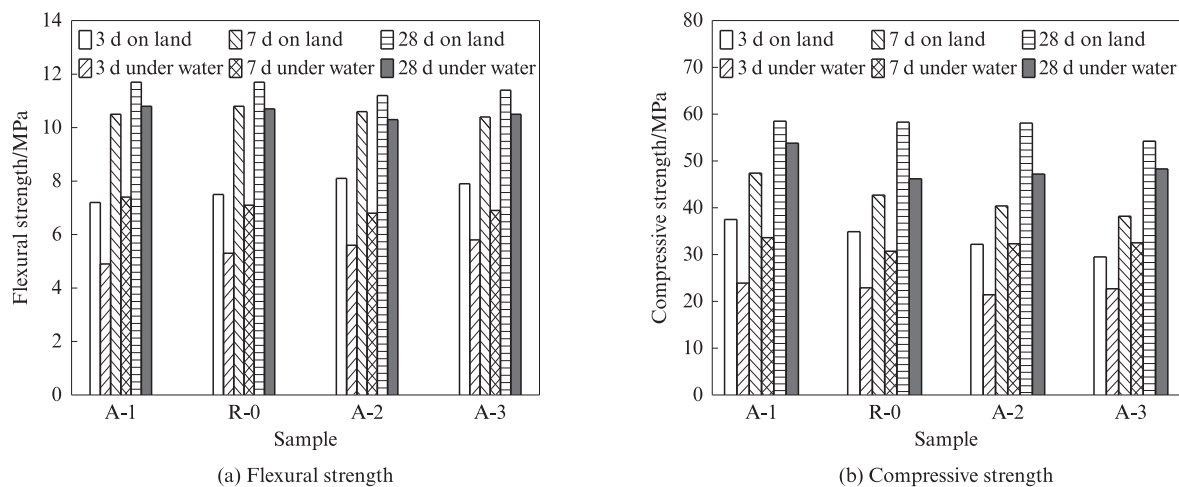


图3 乳胶粉掺量对水下3DP-BM力学性能的影响  
Fig. 3 Effect of FX content on mechanical properties of underwater 3DP-BMs

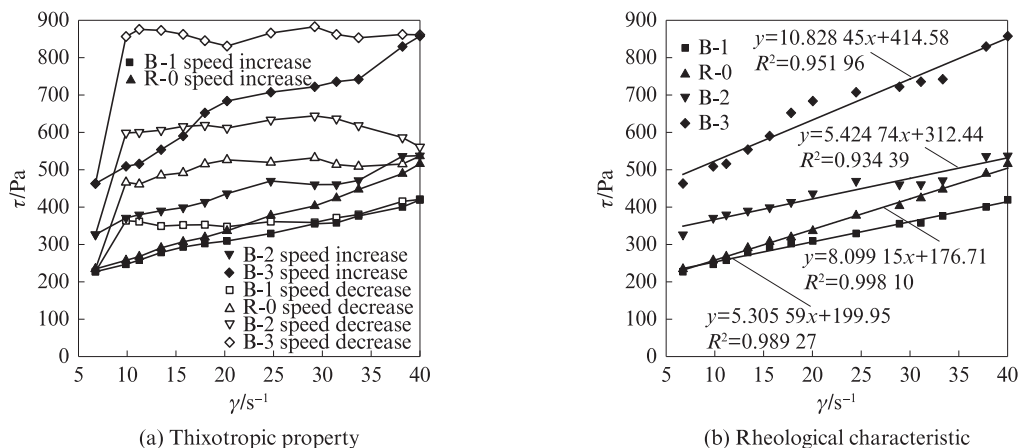


图4 纤维素醚掺量对水下3DP-BM触变性能和流变特性的影响  
Fig. 4 Effect of HM content on thixotropic properties and rheological characteristics of underwater 3DP-BMs

步增加,水下3DP-BM的触变性能逐渐增强.由图4(b)可见:纤维素醚掺量为0%,0.100%,0.200%和0.300%时,水下3DP-BM对应的屈服应力分别为199.95、176.71、312.44、414.58 Pa;增加纤维素醚的掺量,水下3DP-BM的屈服应力逐渐增大;根据线性拟合的结果,不同纤维素醚掺量的水下3DP-BM与Bingham流体模型的流变特性相符合.

## 2.2.2 工作性能

图5为纤维素醚掺量对水下3DP-BM凝结时间、挤出性能和打印性能的影响.由图5(a)可见,纤维素醚的掺入延长了水下3DP-BM的凝结时间,其掺量越高,3DP-BM的初凝时间和终凝时间的延长更为显著,纤维素醚的缓凝作用与其分子结构中含有的脱水葡萄糖环结构有关<sup>[16]</sup>.由图5(b)可见:未掺纤维素醚的水下3DP-BM流动性较差,在管道中难以泵送挤出;掺入0.100%的纤维素醚后,水下3DP-BM的挤出性能得到显著改善;继续增大纤维素醚掺量,水下3DP-BM的屈服应力和触变性能随

之增大,因而其挤出性能逐渐降低.由图5(c)可见:未掺纤维素醚的3DP-BM无法进行打印堆积,因此其水下和陆上堆积高度为0;3DP-BM的陆上堆积高度随纤维素醚掺量的增加逐渐增大,这是由于其凝结时间得以延长所致,但其水下堆积性能有所降低.

## 2.2.3 抗分散性能

表4为纤维素醚掺量对水下3DP-BM抗分散性能的影响.由表4可见,纤维素醚的掺入改善了水下3DP-BM的抗分散性能,且纤维素醚掺量越高,改善效果越好.

## 2.2.4 力学性能

图6为纤维素醚掺量对水下3DP-BM力学性能的影响.由图6可见:掺入纤维素醚后的3DP-BM,其水、陆成型试件的抗折强度和抗压强度比未掺纤维素醚的3DP-BM有所降低;纤维素醚掺量越大,3DP-BM水、陆成型试件的抗折强度和抗压强度降低越明显.纤维素醚的引气作用使3DP-BM的含气量增大,改变砂浆硬化后的孔隙结构,增大有害孔的尺寸

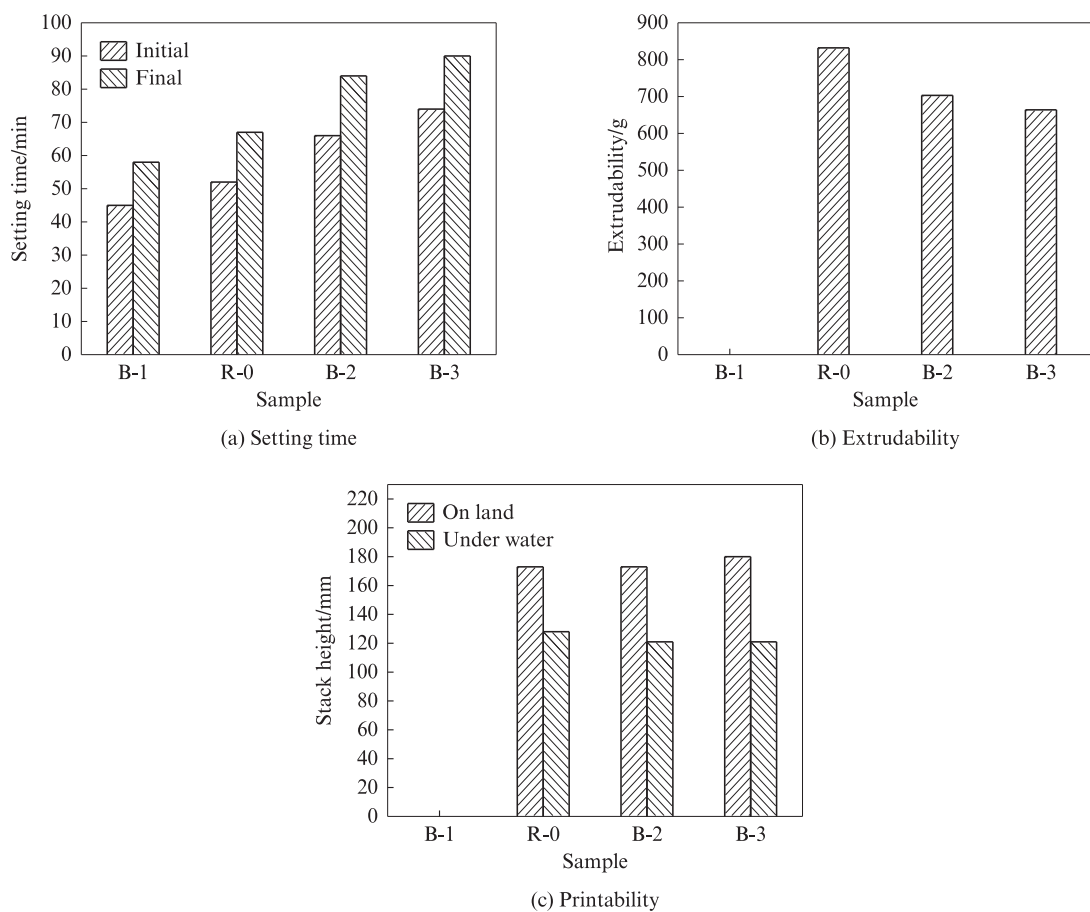


图5 纤维素醚掺量对水下3DP-BM凝结时间、挤出性能和打印性能的影响

Fig. 5 Effect of HM content on setting time, extrudability and printability of underwater 3DP-BMs

表4 纤维素醚掺量对水下3DP-BM抗分散性能的影响

Table 4 Effect of HM content on dispersion resistance of underwater 3DP-BMs

Sample	Mass loss rate/%	pH value			
		5 min	10 min	20 min	30 min
B-1	1.0	10.23	10.25	10.26	10.33
R-0	0.5	9.84	9.86	9.87	9.89
B-2	0.5	9.59	9.68	9.73	9.86
B-3	0.1	9.53	9.61	9.64	9.75

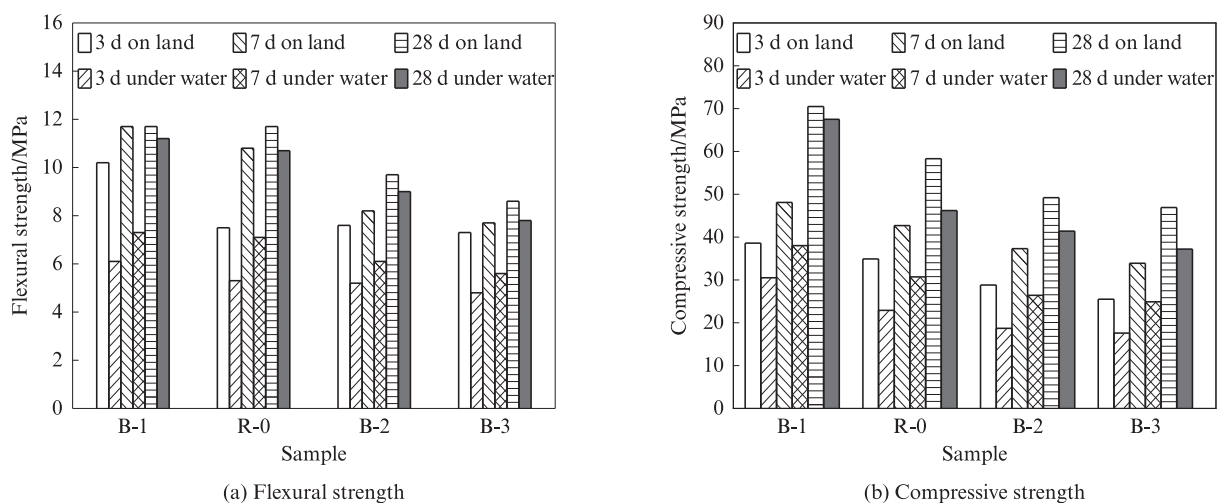


图6 纤维素醚掺量对水下3DP-BM力学性能的影响

Fig. 6 Effect of HM content on mechanical properties of underwater 3DP-BMs

与数量,最终导致其力学性能下降,纤维素醚掺量越多,3DP-BM的力学强度降低越明显<sup>[17]</sup>.因此,为了使水下3DP-BM具有良好的挤出性能,以及水下和陆上堆积性能,纤维素醚的含量应控制在较低范围内,本文纤维素醚的适宜掺量为0.100%.

## 2.3 淀粉醚掺量对水下3DP-BM性能的影响

### 2.3.1 流变性能

图7为淀粉醚掺量对水下3DP-BM触变性能和流变特性的影响.由图7(a)可见:当淀粉醚掺量为0%、0.025%、0.050%和0.100%时,水下3DP-BM的剪切曲线所围面积为2 077.38、4 342.92、4 421.82、4 623.91 Pa/s;当水下3DP-BM中的淀粉醚掺量达到0.025%时,与未掺淀粉醚的水下3DP-BM相比,其触

变环面积增大了约1倍,表明淀粉醚的掺入可显著增强水下3DP-BM的触变性能;水下3DP-BM的触变性能随淀粉醚掺量的增加而增大.由图7(b)可见,淀粉醚掺量为0%、0.025%、0.050%、0.100%时,水下3DP-BM对应的屈服应力分别为149.17、176.71、183.47、290.87 Pa,表明淀粉醚的掺入同时提高了水下3DP-BM的屈服应力,且屈服应力随淀粉醚掺量的增加而增大.淀粉醚改变水下3DP-BM流变性能的机理或与其自身结构有关,经过改性处理后的多糖类天然淀粉形成大量的功能性取代基,其与纤维素醚等复合使用,可显著改善3DP-BM的抗流挂和抗下垂性能<sup>[14,18]</sup>,即在流变参数上表现为3DP-BM的塑性粘度、屈服应力和触变性能有所提高.

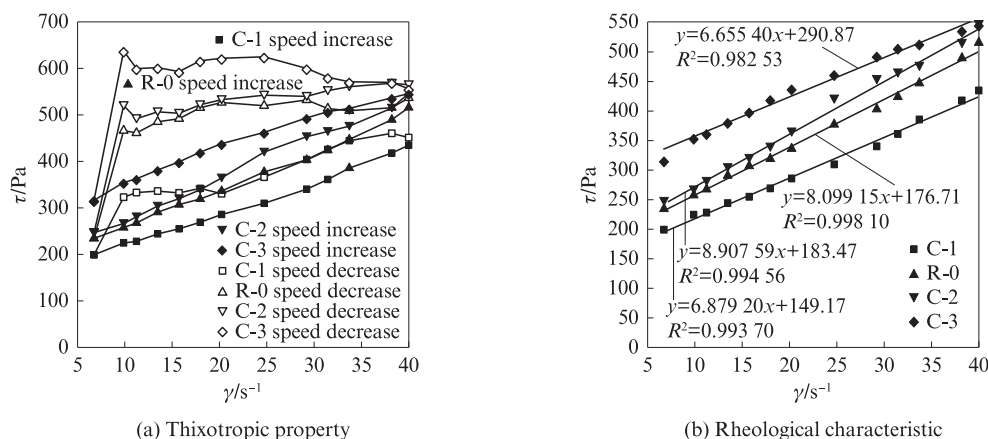


图7 淀粉醚掺量对水下3DP-BM触变性能和流变特性的影响

Fig. 7 Effect of KH content on thixotropic properties and rheological characteristics of underwater 3DP-BMs

### 2.3.2 工作性能

图8为淀粉醚掺量对水下3DP-BM凝结时间、挤出性能和打印性能的影响.

由图8(a)可见,淀粉醚的促凝作用缩短了水下3DP-BM的初凝时间和终凝时间,且随着淀粉醚掺量的增加,水下3DP-BM的初凝时间和终凝时间呈现逐渐减小的趋势.由图8(b)可见:相比于未掺淀粉醚的水下3DP-BM,掺入淀粉醚后的水下3DP-BM的挤出性能有所降低;随着淀粉醚掺量的逐渐增加,水下3DP-BM的挤出性能逐渐降低;当淀粉醚掺量增加至0.100%时,水下3DP-BM的挤出性能为0,这是由于此时砂浆的流动性较差,管内泵送阻力较大,导致其难以被顺利挤出.由图8(c)可见,除了当淀粉醚掺量增加至0.100%时,3DP-BM无法泵送挤出堆积外,淀粉醚对其水下和陆上堆积性能的影响呈现出不同的效果,增加淀粉醚掺量,陆上堆积高度呈现先降低后增加的趋势,水下堆积高度则与之相反.未掺淀粉醚时,3DP-BM的流变参数较小,挤出性能较

好,由于其陆上打印堆积的凝结时间较长,挤出打印成型的砂浆线条相对较宽,增大了3DP-BM层与层之间的接触面积,因而有利于陆上堆积.掺入淀粉醚后,3DP-BM的流变参数显著增加,抗分散性能得到增强,尽管其挤出性能下降,但综合表现为水下打印堆积高度的提升.由图8(c)还可见,当淀粉醚掺量增加至0.050%时,虽然3DP-BM的挤出性能进一步降低,但由于其触变性能有所增强,下层先挤出砂浆的承载能力得到提升,最终表现为陆上打印堆积高度的提升.当淀粉醚掺量为0.050%、陆上打印堆积高度超过220 mm时,从喷头挤出的3DP-BM砂浆条宽度开始减小,达到可堆积高度时的挤出线条宽度明显减小,且线条的均匀性变差.

### 2.3.3 抗分散性能

表5为淀粉醚掺量对水下3DP-BM抗分散性能的影响.由表5可见:淀粉醚的掺入降低了水下3DP-BM的质量损失率与浸水后溶液的pH值,提高了其抗分散性能;水下3DP-BM的抗分散性能随着

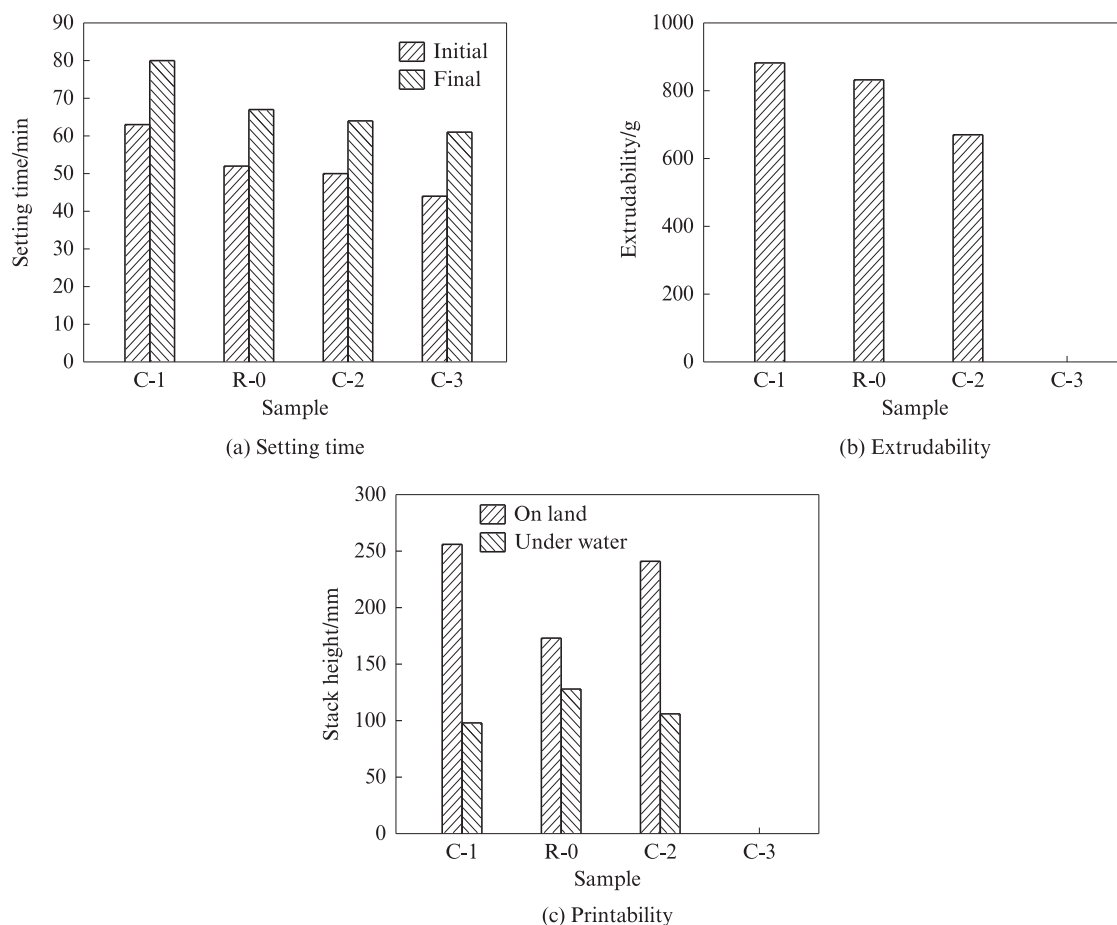


图8 淀粉醚掺量对水下3DP-BM凝结时间、挤出性能和打印性能的影响

Fig. 8 Effect of KH content on setting time, extrudability and printability of underwater 3DP-BMs

表5 淀粉醚掺量对水下3DP-BM抗分散性能的影响

Table 5 Effect of KH content on dispersion resistance of underwater 3DP-BMs

Sample	Mass loss rate/%	pH value			
		5 min	10 min	20 min	30 min
C-1	1.5	9.94	9.98	10.03	10.08
R-0	0.5	9.84	9.86	9.87	9.89
C-2	0.4	9.72	9.75	9.81	9.86
C-3	0.2	9.60	9.62	9.65	9.71

淀粉醚掺量的增加呈现出逐渐降低的趋势.由流变分析可知,这是因为淀粉醚可以提高打印砂浆的流变参数,从而增强了水下3DP-BM的抗分散性能.

### 2.3.4 力学性能

图9为淀粉醚掺量对水下3DP-BM力学性能的影响.

由图9(a)可见:淀粉醚掺量变化时,3DP-BM水、陆成型试件的抗折强度总体变化不大;当淀粉醚掺量为0.025%时,3DP-BM水下成型试件的28 d抗折强度达到最大值.由图9(b)可见:掺入0.025%的淀粉醚后,3DP-BM陆上成型试件的3 d抗压强度相比于未掺淀粉醚的3DP-BM明显增大,水下成型试件的3 d抗压强度略低于未掺淀粉醚的3DP-BM;

0.025%和0.050%淀粉醚掺量的3DP-BM水下成型试件的28 d抗压强度均高于未掺淀粉醚的3DP-BM,表明掺入适量淀粉醚能够有效提高3DP-BM水下成型试件的28 d抗压强度.综合考虑对水下3DP-BM各项性能的影响,淀粉醚掺量0.025%时较为适宜.

综上所述,水下3DP-BM的应用需要多种外加剂的共同作用,如何在工作性能、流变性能、力学性能、抗分散性能之间寻找到一个平衡点是实现水下打印的关键.乳胶粉与纤维素醚的加入都会在一定程度上阻碍水泥的水化进程,延长其凝结时间,尽管相对增加流动性有利,但与之对应的堆积高度与工作性能都会有所降低;掺加淀粉醚后,虽然在一定程度上降低了水下3DP-BM的工作性能,但与乳胶粉、纤



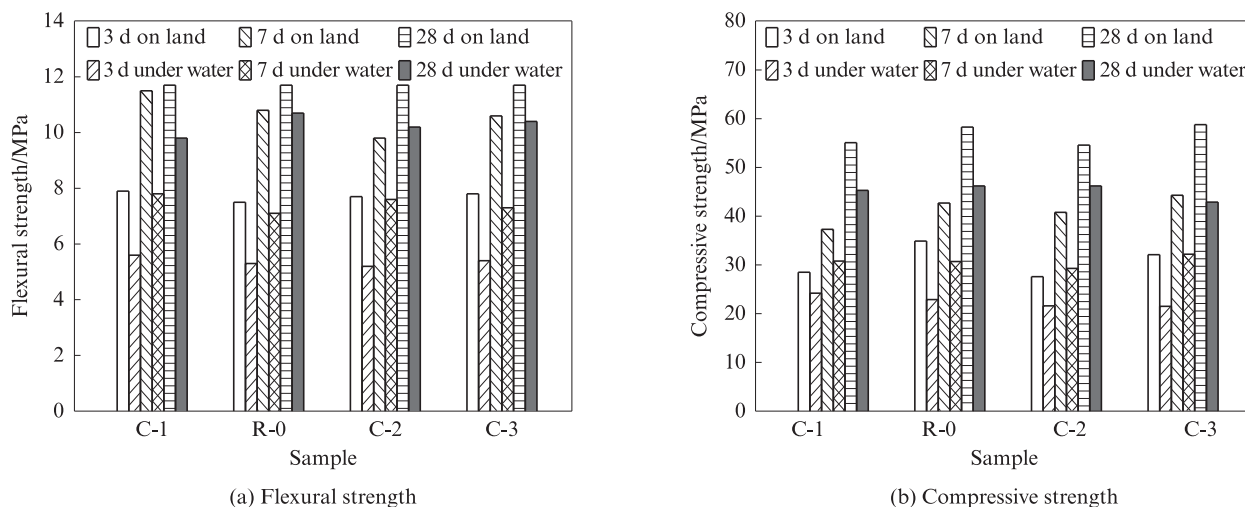


图9 淀粉醚掺量对水下3DP-BM力学性能的影响

Fig. 9 Effect of KH content on mechanical properties of underwater 3DP-BMs

纤维素醚同时加入,可提高打印砂浆的水下抗分散性能和力学性能.通过优化配比,当乳胶粉掺量为0.500%、纤维素醚掺量为0.100%、淀粉醚掺量为0.025%时,可以得到综合性能较为适宜的水下3DP-BM.

### 3 结论

(1)未掺乳胶粉或纤维素醚,以及淀粉醚掺量过高都会导致水下3DP-BM无法进行打印堆积.

(2)增加乳胶粉或纤维素醚的掺量可提高水下3DP-BM的陆上堆积高度以及水下抗分散性能,但乳胶粉或纤维素醚掺量过高会降低打印砂浆的挤出性能和水下堆积高度.

(3)同时掺加乳胶粉、纤维素醚和淀粉醚时,水下3DP-BM具有良好的工作性能,适宜的力学强度和水下抗分散性能,且当乳胶粉掺量为0.500%、纤维素醚掺量为0.100%、淀粉醚掺量为0.025%时,水下3DP-BM具有适宜的可操作时间、良好的水下抗分散性能、较高的水下强度和水下堆积高度.

### 参考文献:

- [1] 杜朝伟,王秀英.水下隧道沉管法设计与施工关键技术[J].中国工程科学,2009,11(7):76-80.  
DU Chaowei, WANG Xiuying. Key technology of design and construction on immersed tube tunnel [J]. Strategic Study of CAE, 2009, 11(7): 76-80. (in Chinese)
- [2] 李迎九.钢板桩围堰施工技术[J].桥梁建设,2011(2):76-79,84.  
LI Yingjiu. Construction techniques of steel sheet pile cofferdams [J]. Bridge Construction, 2011(2): 76-79, 84. (in Chinese)
- [3] 肖烨.水下建筑顶板防水构造设计研究与应用[J].中国建筑防水,2018(17):39-43.  
XIAO Ye. Study and application of waterproofing structure design

for roof plates of under-water construction [J]. Waterproof Construction in China, 2018(17): 39-43. (in Chinese)

- [4] 董徐奋.导管法浇筑水下混凝土的质量控制[J].低温建筑技术,2010,32(3):119-121.  
DONG Xufen. Quality control measures of the method of underwater catheter pouring concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010, 32(3): 119-121. (in Chinese)
- [5] 冯士明.水下混凝土施工技术的关键材料[J].桥梁建设,2002(3):64-66,80.  
FENG Shiming. Construction technology and key materials of underwater concrete [J]. Bridge Construction, 2002(3): 64-66, 80. (in Chinese)
- [6] 陈韶章,苏宗贤,陈越.港珠澳大桥沉管隧道新技术[J].隧道建设,2015,35(5):396-403.  
CHEN Shaozhang, SU Zongxian, CHEN Yue. New technologies used for immersed tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge Project [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(5): 396-403. (in Chinese)
- [7] 孙晓燕,陈龙,王海龙,等.面向水下智能建造的3D打印混凝土配合比优化研究[J].材料导报,2022,36(4):84-92.  
SUN Xiaoyan, CHEN Long, WANG Hailong, et al. Mix proportion optimization of 3D printing concrete for underwater intelligent construction [J]. Materials Reports, 2022, 36(4): 84-92. (in Chinese)
- [8] MAZHOUD B, PERROT A, PICANDET V, et al. Underwater 3D printing of cement-based mortar [J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 458-467.
- [9] LI L G, XIAO B F, FANG Z Q, et al. Feasibility of glass/basalt fiber reinforced seawater coral sand mortar for 3D printing [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101684.
- [10] 杨钱荣,赵宗志,蒋正武.抗分散剂对水下3D打印建筑砂浆性能的影响[J].建筑材料学报,2022,25(5):461-469.  
YANG Qianrong, ZHAO Zongzhi, JIANG Zhengwu. Influence of anti-dispersant on the performance of underwater 3D printing building mortar [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5): 461-469. (in Chinese)

(下转第696页)