

水下不分散混凝土的性能研究综述

梅雨潇

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2026年9月19日; 录用日期: 2026年10月9日; 发布日期: 2026年10月21日

摘要

水下不分散混凝土的快速凝结是其应用于抢险救灾与防渗堵漏、水下结构物的快速修复与加固、特殊与苛刻环境下的水下施工等特殊工程领域的技术要求。然而, 水下环境的复杂性, 体现在水流冲刷和压力变化, 这使得混凝土在早期凝结过程中的稳定性难以保障, 进而对其抗分散性能与早期强度发展提出了极高要求。本文在系统梳理水下不分散混凝土快速凝结技术研究进展的基础上, 通过流变试验研究了絮凝剂(UWB-II型)与聚羧酸系减水剂对水泥浆体工作性能的影响规律。综述部分深入探讨了以速凝剂、抗分散剂、早强剂为核心的外加剂复配技术, 研究了不同速凝剂(铝酸盐、硅酸盐、无机盐类)与各种水泥的适应性, 并涵盖了胶凝材料优化(如硅灰、纳米二氧化硅等矿物掺合料)与工作性保障(如纤维素醚、絮凝剂等新型抗分散剂)等方面的研究进展, 对比分析了不同技术方案的优劣、适用条件及其对混凝土最终力学性能与耐久性的影响。试验结果表明, 絮凝剂掺量对浆体屈服应力呈现“低掺量抑制、高掺量增强”的双重作用, 对幂律指数则呈非单调影响; 减水剂可在一定范围内缓解工作性与抗分散性之间的矛盾。最后, 在指出速凝与工作性难以兼顾、长期耐久性评估不足等现存挑战的基础上, 本文对未来研究路径进行了展望, 强调其重点应聚焦于: 开发绿色复合型外加剂、应用智能材料以精准调控凝结行为, 以及建立可靠的长期性能预测模型。本综述旨在为水下快速凝结混凝土的材料设计与工程应用提供理论参考。

关键词

水下不分散混凝土, 快速凝结, 流变性能, 抗分散性, 絮凝剂

Research of Anti-Washout Underwater Concrete

Yuxiao Mei

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: September 19, 2026; accepted: October 9, 2026; published: October 21, 2026

Abstract

The rapid setting of non-dispersible underwater concrete is a technical requirement for its application

文章引用: 梅雨潇. 水下不分散混凝土的性能研究综述[J]. 土木工程, 2026, 15(10): 50-58.
DOI: 10.12677/hjce.2026.1510237

in emergency rescue and disaster relief, seepage prevention and leakage control, rapid repair and reinforcement of underwater structures, and underwater construction in special and harsh environments. However, the complexity of the underwater environment, characterized by water flow scouring and pressure changes, makes it difficult to ensure the stability of concrete during the early setting process, thereby imposing extremely high demands on its anti-dispersion performance and early strength development. Based on a systematic review of the research progress on rapid setting technology of non-dispersible underwater concrete, this paper experimentally investigated the effects of flocculant (UWB-II type) and polycarboxylate superplasticizer on the workability of cement paste. In the review part, the admixture compounding technology centered on accelerators, anti-dispersants and early-strength agents was discussed in depth; the adaptability of different accelerators (aluminate, silicate and inorganic salt types) to various cements was studied; and the research progress in cementitious material optimization (mineral admixtures such as silica fume and nano-silica) and workability assurance (novel anti-dispersants such as cellulose ethers and flocculants) was summarized. The advantages and disadvantages of different technical solutions, their applicable conditions, and their effects on the final mechanical properties and durability of concrete were compared and analyzed. The experimental results show that the flocculant dosage exhibits a dual effect of “inhibition at low dosage and enhancement at high dosage” on the yield stress of paste and has a non-monotonic influence on the power-law index; the superplasticizer can alleviate the conflict between workability and anti-washout resistance to a certain extent. Finally, based on the existing challenges such as the difficulty in balancing rapid setting and workability and the insufficiency of long-term durability assessment, future research directions were prospected, emphasizing the development of green composite admixtures, the application of smart materials to precisely control the setting behavior, and the establishment of reliable long-term performance prediction models. This review aims to provide theoretical references for the material design and engineering application of underwater rapid-setting concrete.

Keywords

Non-Dispersible Underwater Concrete, Rapid Setting, Rheological Property, Anti-Washout Resistance, Flocculant

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代土木工程不断向水域拓展, 诸如跨海大桥基础、水利枢纽修复、海底隧道及海上风电基础等水下工程建设日益增多[1][2]。然而, 水域环境所特有的水流扰动、波浪作用及深水压力等因素, 极大地影响了混凝土在水下的施工质量。传统混凝土在水下浇筑时容易出现水泥浆体被冲刷、骨料沉积分离等问题[3][4], 不仅造成混凝土强度下降和耐久性不足, 还可能引起水体富营养化等生态问题。为解决这一技术难题, 科研人员研发出了水下不分散混凝土[5]-[7]。该类混凝土通过掺入絮凝剂等功能性添加剂, 显著增强了拌合物在水体中的抗分散能力, 使水泥与骨料能够共同沉降并形成整体结构[8]-[10]。同时, 该材料具备良好的自流平、自密实特性, 无需振捣即可完成模具填充, 有效保证了水下结构的均匀性和密实度。在实现水下不分散的基础上, 快速凝结性能的调控尤为关键[11]。在动态水环境中, 仅靠抗分散性难以确保工程质量, 而快速凝结技术能够使混凝土在入水后迅速形成初始强度, 有效抵抗水力冲刷, 提早提供结构支撑。本文系统梳理水下不分散混凝土快速凝结技术的研究现状, 重点阐述其材料组成与

作用机理，分析实现快速凝结的技术路径，总结性能评价方法，并探讨该技术面临的挑战与发展方向，以期对相关工程应用提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 原材料

本次试验采用 P·O 42.5 等级普通硅酸盐水泥，其表观密度为 3050 kg/m³，比表面积为 356 m²/kg，标准稠度需水量为 27.2%，初凝与终凝时间依次为 223 min 和 273 min。掺合料选用Ⅱ级粉煤灰，表观密度为 2250 kg/m³，需水量比为 98.3%，活性指数达 76.1%。减水剂为江苏苏博特新材料股份有限公司提供的聚羧酸系高性能减水剂，其减水率为 25.0%。絮凝剂采用中国石油集团工程技术研究院开发的 UWB-II 型白色粉末状产品[12]，拌合用水为西安市自来水。

2.2. 实验设计及配合比

本研究首先将未添加絮凝剂与减水剂的浆体(编号 U0)设定为对比组。随后，设计了两部分试验：首先进行了 6 组不同絮凝剂掺量的试验；随后在絮凝剂掺量固定为 2.0% 的条件下，进行了 3 组不同减水剂掺量的试验。所有配比均以前期 UNC 配合比为基础，水胶比设定为 0.40。其中，絮凝剂与减水剂均按外掺法加入，其用量不计入浆体总体积，并以相对于胶凝材料总质量的百分比来表示其掺量。具体试验配合比例见表 1。

Table 1. Mix proportion of slurry test/(kg/m³)
表 1. 试验浆体的配合比/(kg/m³)

编号	水	水泥	粉煤灰	絮凝剂	减水剂
U0	514.3	970.3	320.2	0	0
U0.5	514.3	970.3	320.2	0.5	0
U1.0	514.3	970.3	320.2	1.0	0
U1.5	514.3	970.3	320.2	1.5	0
U2.0	514.3	970.3	320.2	2.0	0
U2.5	514.3	970.3	320.2	2.5	0
U3.0	514.3	970.3	320.2	3.0	0
U2.0P0.5	514.3	970.3	320.2	2.0	0.5
U2.0P1.0	514.3	970.3	320.2	2.0	1.0
U2.0P1.5	514.3	970.3	320.2	2.0	1.5

2.3. 实验方法

按照《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T 8077-2023)中规定的方法开展浆体的流动度测试试验。采用 Brookfield RST-SST 流变仪进行浆体流变性能测试试验，转子型号为 VT-40-20。流变性能测试预剪切阶段的剪切速率在 30 s 内从 0 匀速增至 50 s⁻¹，恒定剪切 60 s 后再匀速减至 0，并静置 60 s；正式剪切阶段的剪切速率则在 100 s 内从 0 线性增至 100 s⁻¹ (上升段)，随后再线性减至 0 (下降段)。根据流变仪测试数据可以绘制剪切应力 - 剪切速率曲线(流变曲线)。

3. 实验结果与分析

3.1. 流动度

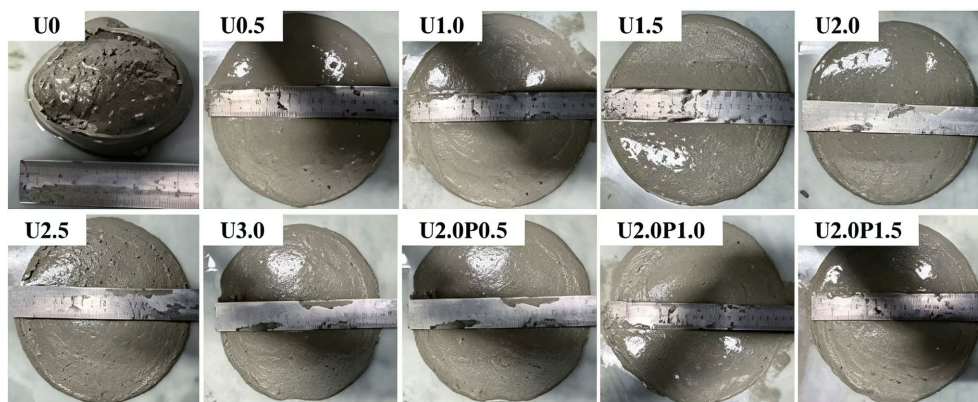
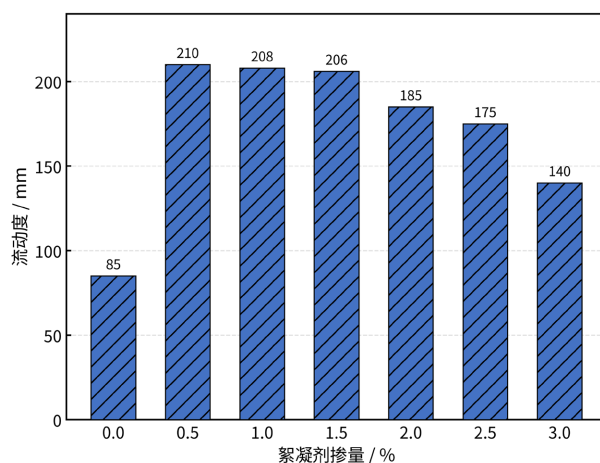
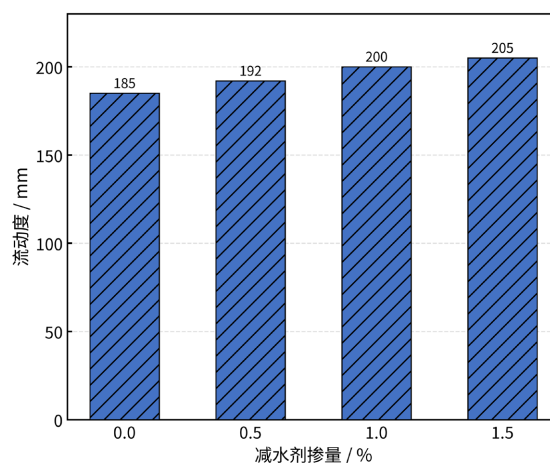


Figure 1. Slurry flow situation
图 1. 浆体流动情况

图 1 为试验过程中浆体的典型流动状态，图 2 展示了浆体流动度的测试结果。分析图 2(a) 可发现，未掺外加剂的对比组流动度仅为 85 mm。随着絮凝剂的掺入，流动度呈现先急剧增大、后保持稳定、再显著降低的变化[8]。值得注意的是，即使掺量增至 3.0% (流动度为 140 mm)，其值仍较对比组显著提高了 64.7%。从图 2(b) 可以看出，当絮凝剂掺量固定为 2.0% 时，流动度随减水剂掺量增加至 1.0% 而增大至 200 mm，其后增长曲线进入平台期。



(a) 不同絮凝剂掺量对流动性的影响



(b) 絮凝剂掺量 2.0% 下不同减水剂掺量对流动性的影响

Figure 2. Results of slurry fluidity test

图 2. 浆体流动度测试结果

3.2. 流变性能

图 3 展示了不同絮凝剂与减水剂掺量下浆体的流变曲线。分析可知：剪切应力随剪切速率的增加而单调递增。同时，絮凝剂掺量的提高会明显提升剪切应力。

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中： τ 为剪切应力，Pa； $\dot{\gamma}$ 为剪切速率， s^{-1} ； τ_0 为屈服应力，Pa； k 为稠度因子， $Pa \cdot s^n$ ； n 为幂律指数（ $n < 1$ 表示剪切变稀， $n > 1$ 表示剪切增稠， $n = 1$ 表示标准 Bingham 线性模型）。

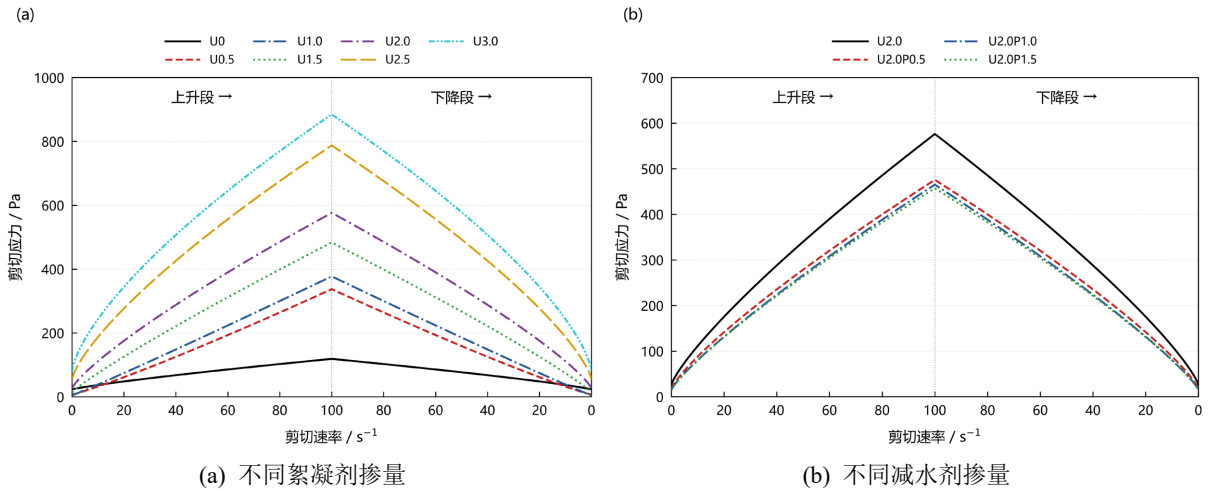


Figure 3. Rheological curves of slurry
图 3. 浆体的流变曲线

Table 2. Fitting results of rheological parameters
表 2. 流变参数拟合结果

编号	τ_0 /Pa	k /(Pa·s)	n	R^2
U0	22.8	2.1	0.83	0.996
U0.5	7.0	1.9	1.12	0.998
U1.0	4.5	3.1	1.04	0.997
U1.5	13.4	7.8	0.89	0.996
U2.0	26.0	13.2	0.81	0.998
U2.5	53.5	24.3	0.74	0.997
U3.0	78.7	33.6	0.69	0.999
U2.0P0.5	17.1	11.0	0.81	0.996
U2.0P1.0	15.3	9.4	0.84	0.998
U2.0P1.5	13.9	9.7	0.83	0.998

根据表 2 拟合结果，分析不同絮凝剂和减水剂掺量对屈服应力、稠度因子、幂律指数的影响。

(1) 屈服应力。试验表明，外加剂掺量对屈服应力有决定性影响。絮凝剂的影响表现为先降后升：在掺量 1.0% 时出现谷值 4.5 Pa（较对比组降低 80.3%）；在掺量 3.0% 时出现峰值 78.7 Pa（较对比组激增 245.2%），揭示了其“低掺量抑制、高掺量增强”的双重作用。减水剂的影响则表现为持续降低屈服应力，但存在饱和现象：掺量超过 0.5% 后效益递减，并在掺量 1.5% 时达到最低值 13.9 Pa。此外，研究还发现，高絮凝剂掺量会显著削弱减水剂的降粘效率。从胶体与界面科学角度分析，絮凝剂对屈服应力的双重作用源于其吸附形态的转变：低掺量时，高分子絮凝剂分子链以平躺吸附形态覆盖于水泥颗粒表面，通过空间位阻与静电排斥作用拆散颗粒间的原生絮凝结构，体系屈服应力随之降低；当掺量超过临界值后，过量高分子长链在相邻颗粒间发生桥连吸附，形成贯穿浆体的连续三维网状结构，颗粒间相互作用力显著增强，屈服应力大幅上升[13]。减水剂对屈服应力的降低作用则源于其吸附后提供强静电斥力与空间位

阻,持续削弱颗粒间絮凝网络,但受限于颗粒表面的饱和吸附量,其降粘效率随掺量增大而趋于饱和[11]。

(2) 稠度因子。稠度因子是反映浆体黏稠度的重要参数之一。分析其变化规律发现:总体而言,稠度因子随絮凝剂掺量增加而增大(仅当掺量为 0.5%时出现例外性小幅降低),并在掺量 3.0%时增至最大,说明提高絮凝剂掺量是增强浆体黏稠度的有效途径。另一方面,增大减水剂掺量则整体上降低了稠度因子,但值得注意的是,当减水剂掺量超过 1.0%后,其变化幅度显著收窄,表明此时减水剂对黏稠度的调控能力趋于饱和。

(3) 幂律指数。幂律指数是 H-B 流变模型中的核心参数,其数值直接决定了浆体在剪切作用下的流型(小于 1 为剪切变稀,即假塑性流体;大于 1 为剪切变稠)。本研究观察到,该指数随絮凝剂掺量增加呈现非单调性变化:从对比组的 0.83(剪切变稀)上升至 0.5%掺量时的 1.12(转为剪切变稠),随后持续下降,在 3.0%掺量时降至 0.69(剪切变稀增强)。这表明存在一个约 1.0%的临界掺量,使得浆体的流型发生根本转变。反观减水剂,其掺量变化并未对幂律指数产生系统性影响,证实其主要用于改变浆体的屈服应力与黏度,而非其剪切稀化或稠化的本质特性。从高分子物理角度分析,幂律指数的非单调变化与浆体内部网络结构的剪切响应密切相关:掺量 0.5%时,分散良好的高分子链在剪切流场中沿流动方向伸展,链间瞬时缔合作用使表观黏度随剪切速率升高而增大,表现为剪切变稠;当掺量超过临界值后,连续絮凝网络在高剪切速率下发生逐步破坏,网络破坏速率大于重构速率,表观黏度随剪切速率升高而降低,表现为剪切变稀,且网络越致密,剪切变稀程度越显著。

3.3. 力学性能

压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量是评估水下不分散混凝土性能的关键力学参数[14][15]。同时,水陆强度比作为一项重要评价指标,其值通常不应低于 70%,以控制因水下施工导致的强度损失[4][15]。除规范中规定的 7 天与 28 天水下成型强度及最小水陆强度比外,另一个常被忽略的指标是水下成型试件强度与陆上未掺抗分散剂空白组试件强度的比值,该比值能更直观地反映水下不分散混凝土的真实强度损失情况。水陆强度比主要体现浇筑环境对强度的影响,而水空强度比则进一步综合反映了抗分散剂引入所带来的复合效应[16]。

在硬化性能研究方面,已有较多关注水下不分散混凝土的力学行为[16]-[19]。相较于常规混凝土,该类混凝土需兼顾工作性与抗分散性之间的动态平衡。为此,研究多通过复配具有降粘与增粘作用的矿物掺合料以协调二者关系[20]。例如,将适量粉煤灰(约 20%)与 4%矿粉复合掺入,可使新拌混凝土在具备良好抗分散能力的同时保持理想的流动性,且硬化后的抗压强度满足标准要求。此外,掺入纳米颗粒(如纳米 SiO_2)也被证实可进一步提升混凝土的综合性能,如提高结构密实度并增强拌合物粘度,相关研究也支持这一结论[21][22]。

3.4. 耐久性能

在耐久性方面,现有研究多集中于常规指标,如抗渗透性、抗氯离子侵蚀及耐海水侵蚀性能等对水下不分散混凝土的作用[16][23][24]。鉴于该类混凝土多应用于海洋环境[25],海水中富含的盐离子会一定程度上促进水泥早期水化,致使水下成型混凝土的早期强度甚至略高于陆上混凝土;然而,从长期性能看,这些侵蚀性离子仍会对强度发展产生不利影响。通过掺入矿物掺合料,可有效提升其耐久性能[20][26];此外,絮凝剂的种类不同,也会对混凝土的抗压强度与耐久性带来差异化的影响[10]。

3.5. 施工技术与应用

根据实际工程调研,目前我国的水下浇筑施工仍以导管法(用于普通混凝土)为主,水下不分散混凝土的应用相对有限,多用于非承重构件或特定工况,如抗洪抢险、水下修补、无法实施围堰等场景[1][2]。

例如在桐子林水电站明渠导墙基础与墙身修复、新开河河口应急防护、三峡重件码头建设、淀东水利枢纽泵闸改扩建等工程中,虽尝试采用导管法或泵送法配合水下不分散混凝土进行浇筑[2] [27] [28],但由于掺入絮凝剂后混凝土粘度显著增大,给导管及泵送施工带来较大困难。因此,业界期待未来能进一步优化水下不分散混凝土的材料性能,使其在不依赖特殊机具的条件下,实现直接水中浇筑,从而拓宽其工程适用性。

3.6. 仍面临以下几方面关键挑战

其一,针对高流速、高水压环境的专用抗分散剂研发仍显不足,相应的抗分散性测试装置与配套标准体系尚不完善,亟待加强[29] [30]。动水条件不仅影响混凝土的浇筑过程,也会对已浇筑但尚未硬化的混凝土表层稳定性造成显著干扰[25],这一影响不容忽视。

其二,工作性与抗分散性之间的动态平衡是实现水下浇筑的核心难题[11]。目前常用的减水剂虽能有效提升流动性,但其掺量增加往往导致抗分散性能下降,且现有产品多适用于普通混凝土。开发适用于水下不分散混凝土的特种减水剂,有望成为协调两者矛盾的重要方向。

其三,现有研究对水下不分散混凝土的长期耐久性关注不足[24]。相关试验多基于短龄期及淡水环境开展,而实际海洋工程中混凝土除面临动水冲击外,还需承受多种离子的侵蚀作用。因此,开展严酷环境下该类混凝土的抗渗与抗腐蚀性能研究具有重要意义。

其四,当前工程中应用的水下不分散混凝土强度普遍偏低[31]。随着建设需求向高强度方向发展,高强型混凝土的研发需求日益突出。然而,絮凝剂的掺入易引起缓凝并削弱最终强度,同时高强混凝土的工作性与抗分散性更难兼顾。如何实现高强度与良好施工性能的统一,仍需深入探索。

4. 讨论

4.1. 浆体流变参数与水下宏观性能的内在关联

试验结果表明,浆体的流变参数与水下不分散混凝土的宏观性能之间存在密切关联,这种关联为理解综述部分所提出的“工作性与抗分散性难以兼顾”的共性难题提供了量化依据[11]。屈服应力是反映浆体抗分散能力的关键参数:当屈服应力过低时(如对比组 U0 与掺量 1.0% 的 U1.0 组, τ_0 均小于 10 Pa),浆体内部絮凝结构薄弱,入水后易被水流冲刷稀释,水泥浆体流失严重,抗分散性能差;当屈服应力过高时(如 U3.0 组, τ_0 达 78.7 Pa),浆体黏聚性过强,流动度显著下降,施工泵送与自密实填充困难。本试验中,絮凝剂掺量 2.0% (U2.0 组)时屈服应力为 26.0 Pa,对应流动度约 140 mm,处于黏聚性与流动性的临界平衡区间;在此基础上复配减水剂后(U2.0P1.0 组),屈服应力降至 15.3 Pa,流动度提升至 200 mm,表明减水剂可在一定范围内缓解工作性与抗分散性之间的矛盾,但屈服应力下降也意味着抗分散能力同步降低。这与综述部分指出的“减水剂掺量增加往往导致抗分散性能下降”的普遍规律一致[11],揭示了水下不分散混凝土工作性与抗分散性难以兼顾的流变学本质。

4.2. 流变行为的微观机理解释

从胶体与界面科学、高分子物理角度,可以对试验观察到的屈服应力与幂律指数非单调变化提出如下机理假设。其一,屈服应力随絮凝剂掺量“先降后升”可归因于高分子絮凝剂在水泥颗粒表面的吸附形态转变:低掺量(0.5%~1.0%)时,絮凝剂分子链平躺吸附于颗粒表面,通过空间位阻与静电排斥作用削弱颗粒间原生絮凝结构,屈服应力降低;掺量超过临界值(约 1.5%)后,过量高分子长链在相邻颗粒间桥连,形成连续三维网状结构,屈服应力显著增大[13]。其二,幂律指数在掺量 0.5% 时由剪切变稀转为剪切变稠($n = 1.12$),可解释为剪切场中分散良好的高分子链沿流动方向伸展,链间形成瞬时缔合网络,表

观黏度随剪切速率升高而增大；随掺量继续增大，连续絮凝网络在高剪切作用下逐步破坏，体系恢复剪切变稀行为，且 n 随掺量增加持续减小[11]。上述机理假设解释了单一组分调控难以兼顾工作性与抗分散性的根本原因，也为复配体系设计提供了理论依据。

4.3. 对工程应用的启示

基于上述分析，针对水下不分散混凝土的工程应用提出以下建议：第一，解决工作性与抗分散性的矛盾不能依赖单一组分，应采用“絮凝剂 + 特种减水剂”复配体系，本试验中 U2.0P1.0 组在保证基本黏聚性的前提下显著提升了流动度，是更具工程应用价值的配比区间；第二，在高流速水下环境中，应优先保证浆体屈服应力达到抗水洗阈值，再通过减水剂微调工作性，避免因过度追求流动度而丧失抗分散能力；第三，在低流速或静水环境中，可适当降低絮凝剂掺量以改善施工性能，实现材料性能与施工条件的匹配。

5. 结论

水下不分散混凝土是实现水下直接浇筑、满足抢险与修复等紧急工程需求的关键材料[1][7]。其核心是在复杂水流环境中保持抗分散性，并实现快速凝结以抵抗冲刷。为实现这一目标，当前研究主要聚焦于通过复加速凝剂、早强剂与抗分散剂(絮凝剂)等外加剂，并优化胶凝体系(如掺入硅灰、纳米材料)来协同提升其早期性能与微观密实度。

然而，该材料的发展面临着一个突出的内在矛盾：工作性与抗分散性之间的动态平衡难以兼顾[21]。实验表明，絮凝剂在提升抗分散性的同时，会显著增加混凝土粘度，损害流动性；而常规减水剂在改善工作性时，又可能削弱抗分散效果。这一矛盾是制约其广泛应用的核心瓶颈。

在性能评价方面，除抗压强度、弹性模量等常规指标外，水陆强度比和水空强度比是更为关键的衡量标准[8][20]。后者能更真实地反映因掺入抗分散剂而造成的强度损失，为全面评估材料性能提供了重要视角。

目前，该领域仍面临几大挑战：缺乏适用于高流速环境的专用抗分散剂与测试标准；对长期耐久性，尤其是在真实海洋环境下的抗侵蚀性能研究不足；絮凝剂的掺入导致高强混凝土的开发困难。因此，未来研究将趋向于开发绿色复合型外加剂、利用智能材料精准调控性能，并建立可靠的长期性能预测模型，以期最终实现不依赖特殊机具的高效、可靠水下浇筑。

参考文献

- [1] 李林涛, 仲伟秋, 程超杰, 等. 水下不分散混凝土的发展与应用[J]. 河南建材, 2020(4): 51-52.
- [2] 仲伟秋, 张庆亮, 张寿维. 水下不分散混凝土的发展与应用[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(S1): 146-151.
- [3] 陈明慧, 熊英建, 李贵阳, 等. 水下不分散混凝土的配制及性能影响[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(9): 121-124.
- [4] 温永向, 周伟, 唐军务. 新浇水下不分散混凝土抗冲刷性能研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(7): 200-211.
- [5] 于壮. 基于水下不分散混凝土性能研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(1): 6-8+113.
- [6] 孟丽丽. 外加剂对水下不分散混凝土影响研究[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(9): 54-57.
- [7] 吕欢, 吴泽波, 陈茜, 等. 水下不分散混凝土的研究综述[J]. 建材世界, 2022, 43(4): 18-21.
- [8] 杨武, 王周渊, 叶舟, 等. 絮凝剂用量对水下不分散混凝土性能影响的研究[J]. 建材世界, 2023, 44(2): 13-17.
- [9] 黄文彬. 硅灰掺量对水下自密实不分散混凝土性能的影响[J]. 建材世界, 2023, 44(1): 5-7.
- [10] 刘明乐, 杜保立, 何德灵, 等. 不同絮凝剂对水下不分散混凝土的影响[J]. 广东建材, 2017, 33(4): 48-50.
- [11] Sun, Z., Xu, B., Yang, Z., Sun, M., Xian, X. and Chen, B. (2025) Resolving Rheological Dilemma in Non-Dispersible Underwater Concrete: Conflict between Fluidity and Anti-Washout. *Construction and Building Materials*, **493**, Article ID: 143258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143258>

- [12] UWB 系列水下不分散混凝土[J]. 石油工程建设, 2014, 40(4): 46.
- [13] Feng, X.R., Gao, S. and Zhang, Y.Q. (2020) Study on Flocculant for Underwater Non-Dispersible Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **474**, Article ID: 052005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/5/052005>
- [14] 张鸣, 周思通, 王付鸣, 等. 水下不分散混凝土主要参数对性能的影响研究[J]. 混凝土, 2017(8): 140-144+155.
- [15] 仲伟秋, 张庆亮. 水下不分散混凝土的基本力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2009(10): 105-107.
- [16] 孟丽丽. 水下不分散混凝土力学性能及抗冻融性能研究[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(11): 1-4+36.
- [17] 曾涛, 胡洪涛, 黄仁阔, 等. 骨料特征对水下不分散混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(11): 22-27.
- [18] 王进京. 水下不分散混凝土性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2015.
- [19] Geng, H., Wang, H., Li, X., Wang, L., Zhong, H. and Li, C. (2023) An Orthogonal Test Study on the Preparation of Self-Compacting Underwater Non-Dispersible Concrete. *Materials*, **16**, Article No. 6599. <https://doi.org/10.3390/ma16196599>
- [20] 刘海. 矿物掺合料和抗分散剂对水下不分散混凝土性能的影响研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(5): 4-8.
- [21] Wang, J., Huang, K., Chu, H. and Li, J. (2025) Synthesis and Performance Evaluation of Anti-Washout Admixtures for Underwater Non-Dispersive Concrete Based on Nanosilica. *Materials*, **18**, Article No. 2541. <https://doi.org/10.3390/ma18112541>
- [22] Wang, Y., Gu, L. and Zhao, L. (2021) Beneficial Influence of Nanoparticles on the Strengths and Microstructural Properties of Non-Dispersible Underwater Concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **25**, 4274-4284. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1471-1>
- [23] 吕春雨. 基于水下不分散混凝土性能的试验研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(8): 36-40.
- [24] Liu, F., Wang, B., Wang, M. and Yuan, X. (2021) Analysis on Pore Structure of Non-Dispersible Underwater Concrete in Saline Soil Area. *Journal of Renewable Materials*, **9**, 723-742. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.013664>
- [25] Shang, N., Kang, S., Cui, C., Han, Z., Zhou, W. and Guo, X. (2021) Study on Underwater Anti-Washout Concrete in Sediment Environment for Offshore Engineering. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **804**, Article ID: 022104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/804/2/022104>
- [26] Khayat, K.H. and Sonebi, M. (2001) Effect of Mixture Composition on Washout Resistance of Highly Flowable Underwater Concrete. *ACI Materials Journal*, **98**, 289-295.
- [27] 仲伟秋, 谢丽媛, 董爱平, 等. 水下不分散混凝土柱受压性能试验研究[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(4): 41-45.
- [28] 张晓雪. 水下抗分散混凝土制备及性能研究[J]. 建筑施工, 2023, 45(10): 2041-2045.
- [29] 郝彤, 陈茜, 冷发光, 等. 水下不分散混凝土抗分散性能试验方法研究进展[J]. 混凝土, 2023(12): 231-236.
- [30] Jiang, C., Lu, L., Guan, S., Ding, Q. and Hu, S. (2004) Preparation of High Performance Non-Dispersible Concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, **19**, 67-69. <https://doi.org/10.1007/bf03000173>
- [31] Zhang, Z.Z., Ji, Y.S., Ma, Z.G., Zhao, Y., Xu, Z., Gao, F., et al. (2023) Effect of Antiwashout Admixture on Compressive Strength of Alkali-Activated Underwater Non-Dispersible Concrete. *Magazine of Concrete Research*, **75**, 927-938. <https://doi.org/10.1680/jmacr.22.00239>