

多元胶凝材料与聚羧酸外加剂适配的混凝土性能优化研究

茹伦

江苏恒基混凝土有限公司，江苏南京，210000；

摘要：鉴于多元胶凝材料与聚羧酸外加剂适配性欠佳，进而引发混凝土工作性能不佳、强度低、耐久性弱等问题，借助剖析适配性的影响要素，给出分子结构优化、配合比调整等优化方法。某工程在采用优化方案之后，混凝土初始坍落度增加了15%，28天抗压强度提升20MPa，抗渗等级由P6提升到P8，此情况证实了适配优化对混凝土性能有提升效果，为工程中混凝土性能的优化给予实际参考。后续可进一步结合工程环境差异，动态调整优化参数，为不同场景混凝土适配提供更精准的实践依据。

关键词：多元胶凝材料；聚羧酸外加剂；适配性；混凝土性能

DOI：10.64216/3080-1508.25.12.064

引言

混凝土是建筑工程中的核心材料，伴随绿色建筑的发展，节能降耗的多元胶凝材料得以广泛使用。聚羧酸外加剂能提高混凝土的工作性能以及强度，然而它和多元胶凝材料之间的适配情况会直接对混凝土的品质产生影响。在实际的建筑工程中，常会由于适配性欠佳而出现一些问题。对二者适配规律开展研究并探寻优化策略，能解决混凝土的性能缺陷，为工程安全提供保障，进一步推动混凝土行业朝着绿色高效的方向发展，具备重要的工程价值以及现实意义。

1 多元胶凝材料与聚羧酸外加剂的基础认知

多元胶凝材料以水泥为基础，把粉煤灰、矿粉、硅灰等这类掺合料进行复配而成。水泥能提供混凝土早期的强度，粉煤灰可以降低水化热并且改善和易性，矿粉能提升混凝土后期的强度以及耐久性，硅灰则可以增加混凝土的密实度，各个组分按照一定比例复配，能够相互补充优势，同时兼顾混凝土的性能以及绿色环保属性。聚羧酸外加剂的分子包含主链、支链以及官能团，它通过分散、润滑、保坍等作用改善混凝土性能，这种外加剂具有较高的减水率，而且不存在钢筋锈蚀风险。二者的适配性是共同达成混凝土性能要求的匹配度，其核心涵盖了吸附平衡、水化协同以及性能协同，当适配良好时，能够同时提高混凝土指标；而当适配状况不佳时，则会导致混凝土出现性能缺陷。

2 多元胶凝材料与聚羧酸外加剂适配性的影响因素

2.1 多元胶凝材料的组成与品质

适配性直接受多元胶凝材料的组成比例与品质影响。在组成比例维度上，当粉煤灰的掺入量过高时，因其具有较大的比表面积，会大量吸附外加剂，进而使得混凝土的流动性能下降；如果矿粉的掺量超过40%，就会对水泥的水化进程起到延缓作用，这就要求外加剂具备更强的保坍能力，以此适应水化过程缓慢的特性。从品质情况来看，水泥若碱含量较高，就容易和外加剂之间产生化学反应，进而生成难以溶解的物质，使外加剂的效能降低；当粉煤灰的烧失量偏高时，其中含有的碳物质会吸附外加剂，从而减弱其分散作用；如果矿粉的活性指数较低，就需借助外加剂辅助激发活性。

2.2 聚羧酸外加剂的分子结构

适配性的关键影响因素在于聚羧酸外加剂的分子结构。若主链聚合度过高，过长的分子链容易缠绕，进而使分散效率降低；倘若聚合度过低，空间位阻就会不足，也就无法对颗粒团聚进行有效阻止。支链长度要与胶凝材料颗粒尺寸相匹配，过短的支链难以形成足够的空间位阻，而过长的支链则容易相互交织，反而会对流动性产生影响。在官能团类型方面，较高的羧基含量可增强分散能力，不过保坍性会有所下降；磺酸基能够提升外加剂与胶凝材料之间的吸附稳定性，从而使适配性得到改善。

2.3 外部环境与施工条件

外部环境连同施工条件，会通过对水化反应以及外加剂效能施加影响，进而间接地使适配性改变。在温度

因素上，偏高的温度会促使水泥的水化加快，外加剂挥发变快，这就造成坍落度损失的速度较快，故而要求外加剂具备更突出的保坍性能；偏低的温度则会让水化的速度减缓，使外加剂的分散作用持续的时长增加，容易早期强度不够。当湿度较低时，混凝土中的水分蒸发快，其表面容易开裂，需借助外加剂辅助改善保水性能。在施工条件方面，若搅拌时间不足，便会造成外加剂与胶凝材料无法充分混合均匀，局部适配不佳；如果搅拌速度过快，就有可能使外加剂的分子结构遭到破坏，进而降低其效能。

3 适配性对混凝土性能的影响

3.1 对工作性能的影响

混凝土工作性能的优劣直接取决于适配性情况。当适配良好时，混凝土呈现出较大的坍落度、充足的扩展度，并且坍落度损失的速度缓慢，如此便能充分满足泵送以及浇筑需求。然而，当适配情况不佳时，便会引发多种问题：如果外加剂吸附不均匀，就会造成混凝土局部的流动性较差，出现“抓底”现象；如果外加剂的分散能力不足，胶凝材料的颗粒就会团聚，使混凝土的和易性较差，泵送时所面临的阻力较大，而且容易堵管；如果保坍能力不充分，那么混凝土的坍落度损失速度就快，在浇筑过程中，混凝土的流动性会显著下降，难以实现振捣密实的效果，最终形成诸如蜂窝、麻面等缺陷。

3.2 对力学性能的影响

适配性借助改变混凝土的内部构造，对其力学性能产生影响。当适配良好时，外加剂能均匀分散胶凝材料，使水化产物分布均匀，混凝土内部的孔隙数量较少、密实程度较高，抗压强度以及抗拉强度会显著提高。而适配不佳会造成混凝土结构出现缺陷：如果外加剂的量不足，胶凝材料会发生团聚现象，水化反应不够充分，内部存在大量空隙，抗压强度会降低；如果外加剂的量过多，混凝土会出现泌水离析的现象，形成分层结构，表层强度较低，整体力学性能不均匀。

3.3 对耐久性的影响

混凝土适配性是确保其耐久性的关键要素。适配状态良好的混凝土具备高密实度，使外部的水分以及各类有害物质难以渗透进入其内部结构，有较好的抗渗、抗冻与抗碳化性能。反之，当混凝土适配不佳时，其内部

会形成较多孔隙，结构松散，在此情形下，混凝土的抗渗性能显著降低，水分和氯离子能轻易侵入混凝土内部，进而引发钢筋锈蚀；同时，其抗冻性能也会减弱，在经历冻融循环的过程中，混凝土表面容易剥落、开裂；而且适配不良的混凝土抗碳化能力较差，二氧化碳能够快速渗透，对水泥石结构造成破坏，最终导致混凝土的使用寿命缩短。

4 多元胶凝材料与聚羧酸外加剂适配的优化策略

4.1 聚羧酸外加剂分子结构优化

着眼于多元胶凝材料特性，优化外加剂分子结构。调整主链聚合度，当面对高掺量粉煤灰的胶凝体系时，采用具有中低聚合度的主链，减少分子间的缠绕情况，提高分散效率；而针对高矿粉体系，选择具备高聚合度的主链，增强其空间位阻效应，以适配相对缓慢的水化过程。对支链长度进行优化，对细颗粒含量较高的胶凝材料，缩短其支链长度，避免支链之间相互交织；对粗颗粒占比较高的体系，延长支链，从而确保空间位阻能够达到预期效果。调整官能团比例，使羧基的含量增加，从而让分散能力提升，以此适配活性较低的掺合料体系；增加磺酸基比例，让吸附稳定性增强，进而应对碱性较高的水泥体系。

4.2 多元胶凝材料配合比调整

基于工程需求以及外加剂的特性，对胶凝材料的配合比例进行优化。对各类掺合料的占比加以控制，要同时兼顾材料的和易性能与强度情况；矿粉的掺入量把控在30%~40%，以此实现材料早期强度与后期强度的平衡；硅灰的掺入量不可超过5%，防止过度吸附外加剂的情况。筛选高品质的掺合料，选用烧失量低、活性高的粉煤灰，以及活性指数高的矿粉，降低对适配性产生的负面效应。优化颗粒级配，借助调整水泥与掺合料的颗粒分布，让胶凝材料的整体比表面积处于合适范围，从而降低对外加剂的需求。

4.3 施工与养护工艺优化

优化施工工艺以及养护工艺，从而保障适配效果切实达成。在施工环节中，要对搅拌的时长以及速度加以把控，以此保证外加剂和胶凝材料能够充分交融；依据温度变化来对施工时间进行调整，在气温较高时段，挑

选早晨或者傍晚开展施工工作，防止坍落度过快；长距离运输时，选用缓凝类型的外加剂，或者在运输途中额外添加少量的外加剂，以此维持坍落度。在养护环节，高温干燥的环境下，在完成浇筑之后要及时采取覆盖措施以保持湿度，避免水分过快蒸发；在低温环境中要采取相应的保温手段，以推动水化反应的进行。

5 实践案例与性能验证

5.1 案例背景

在某条高速公路的桥梁建造工程中，按照施工要求需要进行C50混凝土的浇筑作业，并采用多元胶凝材料以及聚羧酸外加剂。在工程初始阶段，所使用的混凝土出现了坍落度快速损失的问题，经过28天养护期后进行检测，其抗压强度未能达到预先设定的设计标准。与此同时，该混凝土还表现出抗渗性能欠佳的问题，为解决上述一系列问题，要对多元胶凝材料和聚羧酸外加剂的适配性展开优化工作。

5.2 优化方案实施

为应对问题，实施三项优化举措：其一，优化外加剂分子结构，增高磺酸基的占比，对主链聚合度进行调整，从而增强保坍性能与吸附稳定程度；其二，调整胶凝材料的配合比例，把粉煤灰的掺入量降低至20%，将矿粉的掺入量提高到40%，并选用高活性矿粉；其三，优化施工工艺，把搅拌时长控制在3分钟，在高温的时间段选择在夜间进行浇筑作业，浇筑完成之后采用覆盖的方式进行保湿养护，养护时长为14天。

5.3 性能验证结果

在经过优化后，混凝土性能得到明显提升，具体数据呈现下表。就工作性能而言，起初的坍落度由180毫米升高到207毫米，1小时的坍落度损失从70毫米降低到30毫米，扩展度从450毫米增加到520毫米，能够充分满足泵送需求；从力学性能来讲，7天的抗压强度由32兆帕提高到38兆帕，28天的抗压强度从48兆帕提升到68兆帕，达成设计标准；在耐久性方面，抗渗等级从P6上升到P8，抗冻等级从F150提升至F200，能够符合桥梁工程长期使用的要求。工程顺利完成，期

间并未出现质量问题，情况充分验证了采用的优化策略具备有效性。

| 性能指标 | 优化前 | 优化后 | 改善幅度 |
|----------------|------|------|----------|
| 初始坍落度（mm） | 180 | 207 | 提升 15% |
| 1h 坍落度损失（mm） | 70 | 30 | 降低 57.1% |
| 扩展度（mm） | 450 | 520 | 提升 15.6% |
| 7d 抗压强度（MPa） | 32 | 38 | 提升 18.8% |
| 28d 抗压强度（MPa） | 48 | 68 | 提升 41.7% |
| 抗渗等级 | P6 | P8 | 提升 1个等级 |
| 抗冻等级 | F150 | F200 | 提升 33.3% |
| 凝结时间（初凝，h） | 6.5 | 7.2 | 延长 10.8% |
| 泌水率（%） | 2.1 | 0.8 | 降低 61.9% |
| 弹性模量（28d, GPa） | 32.5 | 36.8 | 提升 13.2% |

6 结论

本文借助对多元胶凝材料和聚羧酸外加剂适配性展开研究，确定了二者适配的影响因素以及对混凝土性能产生的作用规律，所提出的优化策略在工程实例中取得明显成效，促使混凝土28天的抗压强度提高41.7%，抗渗等级上升1个等级。研究显示，适配性良好是混凝土性能实现优化的关键。在未来，需要进一步探寻适配性的动态调控技术，联合智能化的方式对适配参数进行实时的监测与调整，以此推动混凝土材料朝着性能更优、更绿色环保的方向发展，进而为建筑工程质量的提升提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 王晶, 杨玉柱, 黄维蓉. 水泥-蔗渣灰-陶瓷粉三元胶凝材料体系早期水化研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2025, 47(01): 73-80.
- [2] 吉飞, 李伟, 邵楷模, 等. 聚羧酸外加剂对管桩开模免蒸压混凝土和易性的影响[J]. 混凝土世界, 2024, (02): 25-30.
- [3] 郭磊, 张忆庆, 田文峰. 基于污泥的多元固废体系混凝土性能研究[J]. 土木工程学报, 2025, 58(01): 12-21.
- [4] 李伟鹏, 刘文凯, 李祥, 等. 高适应性聚羧酸减水剂在不同材料混凝土中的应用[J]. 混凝土世界, 2021, (04): 72-75.
- [5] 苏嘉. 功能型聚羧酸外加剂在混凝土预制构件中的应用[J]. 中国建材科技, 2020, 29(01): 37-38.