

超细矿粉掺量与水胶比对 PC 管桩混凝土性能及水化机理的影响研究

曹震¹ 张少哲² 周旭辉¹ 张啸瞳¹ 魏云¹

1.新疆互力佳源环保科技有限公司 新疆 乌鲁木齐 830022

2.新疆大学建筑工程学院 新疆 乌鲁木齐 830017

【摘要】为降低 PC 管桩混凝土水泥用量，并协调其高强、早强与工作性能，本文研究了水胶比和超细矿粉掺量对混凝土拌合物性能、抗压强度及水化产物演变的影响。采用坍落度/扩展度测试、不同龄期抗压强度测试、XRD、TG/DTG 和 SEM 等方法，对其宏观性能与微观结构进行分析。结果表明，在水胶比为 0.29 时，超细矿粉掺量由 0%增至 40%，混凝土坍落度保持在 260~270 mm，扩展度在 540~600 mm 范围内波动，说明超细矿粉对坍落度影响较小，但对扩展度影响更为明显。降低水胶比可显著提高混凝土早期强度，其中水胶比 0.26、超细矿粉掺量 10%试件的 1 d 和 28 d 抗压强度分别达到 54.23 MPa 和 77.25 MPa，兼具早期脱模强度和后期强度优势；水胶比 0.26、超细矿粉掺量 30%试件亦能满足强度要求，但早期强度储备相对不足。XRD、TG/DTG 和 SEM 结果表明，超细矿粉早期主要发挥填充效应和晶核效应，中后期通过火山灰反应消耗 CH 并生成更多 C-S-H 凝胶，从而改善孔结构和界面致密性。综合工作性、强度发展和水泥替代效果，建议 PC 管桩混凝土优先采用水胶比 0.26、超细矿粉掺量 10%的配合比；水胶比 0.26、超细矿粉掺量 30%的配合比可作为进一步降低水泥用量的备选方案。

【关键词】PC 管桩混凝土；超细矿粉；水胶比；抗压强度；水化产物；微观结构

1 引言

预制混凝土管桩(PC 管桩)具有承载力高、工厂化程度高、施工效率高和质量稳定等优势，广泛应用于房屋建筑、桥梁、港口及软土地基处理等工程。PC 管桩混凝土通常须具备较高早期强度和较低水胶比，以满足离心成型、脱模、张拉、堆放及运输等生产工艺要求^[1]。然而，传统高强 PC 管桩混凝土往往依赖较高水泥用量来获得早强和高强性能，不仅增加材料成本，也带来较高碳排放。采用工业副产矿物掺合料部分替代水泥，是降低水泥基材料碳排放、改善浆体结构和提高后期性能的重要途径^[5-8]。

粒化高炉矿渣粉具有潜在水硬性和火山灰活性，在水泥水化形成的碱性环境中可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进一步反应，生成低钙硅比 C-S-H 凝胶，从而改善浆体孔结构和界面过渡区性能^[8-10]。当矿粉细度进一步提高时，其物理填充效应和晶核效应增强，有利于优化颗粒堆积、促进水化产物成核，并在一定龄期后通过二次反应提高基体致密性^[9,13]。但超细矿粉比表面积较大，可能增加体系需水量并增强对外加剂的吸附作用；在低水胶比条件下，矿粉活性释放还易受自由水含量和碱度条件限制。若掺量过高，则可能因水泥熟料含量降低而导致早期强度不足。

PC 管桩混凝土对工作性和早强性具有更严格的工艺适配要求。对于离心成型混凝土，拌合物既须具备足够流动性，以保证布料均匀和密实成型，又应避免离析、泌水或扩展度过大引

起的浆体迁移。现有研究多关注普通混凝土中矿粉掺量对强度和耐久性的影响，而针对低水胶比、高胶凝材料用量条件下超细矿粉掺量与水胶比耦合作用的研究仍有待深化^[15-18]。

因此，本文以 PC 管桩用高强混凝土为研究对象，系统考察不同水胶比和超细矿粉掺量对拌合物性能、抗压强度及水化产物演化的影响，并结合 XRD、TG/DTG 和 SEM 分析其作用机理，为绿色高性能 PC 管桩混凝土配合比优化提供参考。

2 试验部分

2.1 原材料

试验采用 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥作为主要胶凝材料，超细矿粉作为矿物掺合料按质量分数等量取代部分水泥。细骨料为天然砂，细度模数为 3.2；粗骨料为连续级配碎石，最大粒径为 20mm；拌和水为自来水。为满足低水胶比高强混凝土工作性要求，试验过程中应根据实际生产条件配合使用与水泥、矿粉适应性良好的高性能减水剂。投稿前建议补充水泥和超细矿粉的化学组成、比表面积、密度及活性指数等基础参数，以增强试验可重复性。

2.2 配合比设计

试验设置 3 个水胶比水平(0.26、0.29、0.32)和 5 个超细矿粉掺量水平(0%、10%、20%、30%、40%)。胶凝材料总量保持为 606.1kg/m³，超细矿粉按质量分数等量取代水泥，砂、石用量随水胶比变化进行适当调整。各组配合比如表 1 所示。

表 1 试验配合比 (kg/m³)

组别	水胶比	超细矿粉掺量/%	水	水泥	超细矿粉	砂	碎石
1	0.26	0	157.6	606.1	0.0	621.8	1014.5
2	0.26	10	157.6	545.5	60.6	621.8	1014.5
3	0.26	20	157.6	484.8	121.2	621.8	1014.5
4	0.26	30	157.6	424.2	181.8	621.8	1014.5
5	0.26	40	157.6	363.6	242.4	621.8	1014.5
6	0.29	0	175.8	606.1	0.0	614.9	1003.3
7	0.29	10	175.8	545.5	60.6	614.9	1003.3
8	0.29	20	175.8	484.8	121.2	614.9	1003.3
9	0.29	30	175.8	424.2	181.8	614.9	1003.3
10	0.29	40	175.8	363.6	242.4	614.9	1003.3
11	0.32	0	193.9	606.1	0.0	608.0	992.0
12	0.32	10	193.9	545.5	60.6	608.0	992.0
13	0.32	20	193.9	484.8	121.2	608.0	992.0
14	0.32	30	193.9	424.2	181.8	608.0	992.0
15	0.32	40	193.9	363.6	242.4	608.0	992.0

2.3 试件制备与养护

试验按设计配合比称量各原材料。搅拌时先将粗骨料、细骨料及胶凝材料干拌，使粉体与骨料初步分散；随后加入拌和水和减水剂进行湿拌，直至拌合物均匀。完成拌和后立即进行坍落度和扩展度测试，并制作抗压强度试件。

抗压强度试件采用立方体试件，成型后在标准条件下养护至规定龄期。到达 1d、3d、7d 和 28d 后进行抗压强度测试。用于 XRD、TG/DTG 和 SEM 分析的样品取自相应龄期抗压破坏后的内部代表性碎块，采用无水乙醇终止水化，随后低温干燥；XRD 和 TG/DTG 样品研磨后过筛，SEM 样品经干燥、喷金后测试。需要说明的是，本文主要开展实验室配比筛选及水化机理分析，后续工程应用仍需结合离心成型、蒸汽养护及足尺管桩段进行验证。

2.4 测试方法

(1) 工作性能。参照 GB/T 50080—2016 进行坍落度和扩展度测试，记录不同矿粉掺量下拌和物的流动性变化^[2]。

(2) 力学性能。参照 GB/T 50081—2019 测试 1d、3d、7d 和 28d 抗压强度，每组试件宜不少于 3 个，取平均值作为测试结果^[3]。

(3) XRD 分析。采用 X 射线衍射分析不同龄期水化产物物相组成，重点关注未水化熟料相、Ca(OH)₂、钙矾石及无定形 C-S-H 凝胶相关特征变化。

(4) TG/DTG 分析。采用热重分析评估水化产物脱水、Ca(OH)₂ 分解及碳酸盐分解过程，辅助判断超细矿粉对水化程度和 CH 消耗的影响。

(5) SEM 分析。采用扫描电子显微镜观察水化产物形貌、孔隙特征及基体致密性，分析超细矿粉对微观结构的改善作用。

3 结果与分析

3.1 工作性能

以水胶比 0.29 试验组为例，超细矿粉掺量对混凝土坍落度影响较小，但对扩展度影响相对明显（图 1）。基准组坍落度为 260mm，当超细矿粉掺量为 10%时，坍落度提高至 270mm，较基准组增加 3.8%；当掺量提高至 20%~40%时，坍落度基本保持在 260mm 左右。说明在本试验范围内，超细矿粉掺入并未对混凝土坍落度产生明显不利影响。

扩展度随超细矿粉掺量增加呈现降低后回升的变化趋势。基准组扩展度为 590mm，10%掺量时降至 540mm，降幅为 8.5%；20%掺量时恢复至 590mm，30%掺量时为 580mm，40%掺量时进一步增至 600mm。该结果表明，少量超细矿粉可能因吸附自由水或改变外加剂分散状态而降低浆体扩展性能；随着掺量继续增加，矿粉颗粒的填充效应和浆体润滑作用增强，使扩展度逐渐回升。

从 PC 管桩离心成型适配性来看，坍落度过低不利于布料和密实成型，而扩展度过大则可能增加浆体迁移和离析风险。综合图 1 结果，水胶比 0.29 条件下，10%超细矿粉掺量表现出较适中的扩展度；20%~40%掺量下扩展度相对偏高，实际应用时应结合减水剂掺量、离心制度和生产线布料状态进行进一步优化。

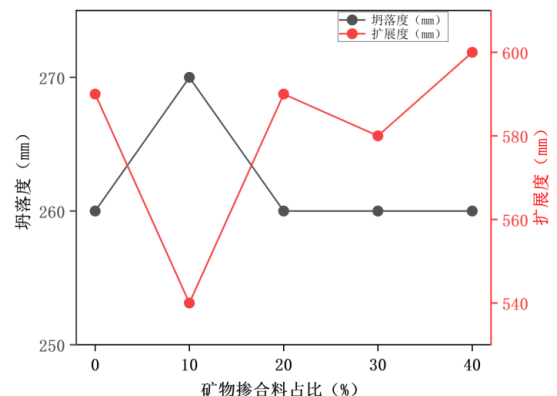


图 1 水胶比 0.29 时超细矿粉掺量对混凝土工作性的影响

3.2 抗压强度

不同水胶比下混凝土早期抗压强度发展规律如图 2~图 4 所示。总体来看,水胶比对早期强度影响显著。当水胶比由 0.26 提高至 0.32 时,1d 抗压强度明显降低,说明较低水胶比有利于形成更致密的早期水化结构。但超细矿粉掺量与强度之间并非简单线性关系,其作用效果受水胶比、替代率和龄期共同影响。

当水胶比为 0.26 时,10%超细矿粉掺量组 1d 抗压强度最高,达到 54.23MPa,较基准组 45.20MPa 提高约 20.0%;30%和 40%掺量组 1d 强度分别为 46.41MPa 和 52.63MPa,仍能满足较高早强要求,而 20%掺量组 1d 强度相对偏低。3d 强度随矿粉掺量变化总体保持较高水平,表明在低水胶比条件下,适量超细矿粉可通过填充效应和晶核效应优化颗粒堆积,促进早期强度发展。

当水胶比为 0.29 时,基准组和 10%矿粉组 1d 抗压强度分别为 47.75MPa 和 47.18MPa,均能满足早期强度要求;但当矿粉掺量提高至 20%及以上时,1d 强度降至 38.07~42.36MPa,难以满足 PC 管桩快速脱模需求。水胶比为 0.32 时,各组 1d 强度均低于 36MPa,尽管部分试件 7d 和 28d 强度仍持续增长,但早期强度不足限制了其在 PC 管桩生产中的适用性。

由此可见,PC 管桩混凝土配合比优化应优先满足早期脱模强度要求,并兼顾后期强度发展和水泥替代率。适量超细矿粉能够改善低水胶比体系的颗粒堆积和早期水化结构,但过高替代率会产生熟料稀释效应,导致早期水化产物不足,从而降低早期抗压强度。

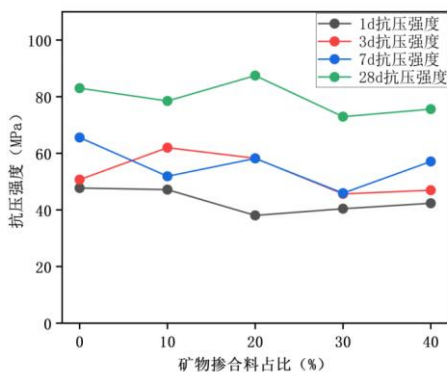


图 2 水胶比 0.26 时混凝土抗压强度

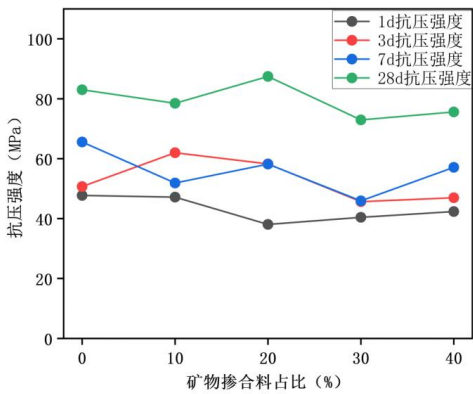


图 3 水胶比 0.29 时混凝土早期抗压强度

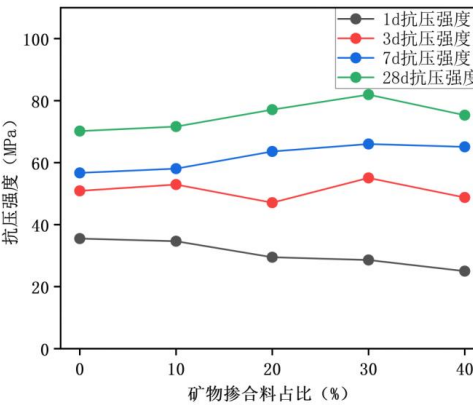


图 4 水胶比 0.32 时混凝土早期抗压强度

3.3 配合比筛选与推荐

结合 GB/T 13476—2023 中 PC 管桩对高强混凝土性能的要求,并考虑生产过程中快速脱模和离心成型的工作需求,本文将 1d 抗压强度不低于 45MPa、3d 抗压强度不低于 50MPa、28d 抗压强度不低于 77.2MPa 作为强度筛选依据;同时将坍落度控制在 250~300mm、扩展度控制在 400~550mm 作为工作性参考范围。基于现有试验数据得到初步筛选结果见表 2。

由表 2 可知,水胶比 0.26、超细矿粉掺量 10%组在 1d 强度、28d 强度和工作性方面均表现出较好平衡,可作为优先推荐配合比。该组在满足早期脱模强度要求的同时,可使水泥用量由 606.1kg/m³ 降至 545.5kg/m³,水泥替代量约为 60.6kg/m³,兼具技术可行性和减碳潜力。水胶比 0.26、超细矿粉掺量 30%组同样满足筛选指标,水泥替代量约为 181.8kg/m³,但其 1d 强

表 2 配合比初步筛选结果

水胶比	矿粉掺量/%	1d 强度/MPa	28d 强度/MPa	坍落度/扩展度 /mm	筛选结论
0.26	0	45.20	74.66	275/460	-
0.26	10	54.23	77.25	275/460	合格,推荐
0.26	20	27.38	72.13	260/485	早期与 28d 强度不足,剔除
0.26	30	46.41	77.35	265/480	合格,备选
0.26	40	52.63	75.71	260/590	28d 强度不足且扩展度偏大,剔除
0.29	0	47.75	83.00	260/590	-
0.29	10	47.18	78.50	270/540	合格,可作为工艺备选
0.29	20~40	38.07~42.36	72.97~87.48	—	1d 强度不足,剔除
0.32	0~40	25.04~35.52	70.20~81.97	—	1d 强度不足,剔除

度储备低于 10% 掺量组, 对生产波动和养护制度更为敏感, 宜作为进一步降低水泥用量的备选方案。

水胶比 0.29、超细矿粉掺量 10% 组也可满足基本性能要求, 但与水胶比 0.26、超细矿粉掺量 10% 组相比, 其早期强度和后期强度优势不明显, 且生产过程中对拌合物稳定性控制要求较高。因此, 综合强度安全储备、工作性和水泥替代效果, 本文推荐水胶比 0.26、超细矿粉掺量 10% 作为最优配合比, 水胶比 0.26、超细矿粉掺量 30% 作为次优配合比。

3.4 XRD 物相分析

普通组和超细矿粉改性组不同龄期 XRD 谱图如图 5 和图 6 所示。图中标号为 1 特征峰对应产物为 CH, 标号为 2 的特征峰对应产物为未水化水泥熟料矿物 (C_3S+C_2S), 标号为 3 的特征峰对应产物为水化硅酸钙 (C-S-H 凝胶), 两组试件的水化产物演变规律总体一致。随着养护龄期延长, 未水化 C_3S/C_2S 等熟料矿物特征峰逐渐减弱, 表明水泥水化持续进行; 同时, $Ca(OH)_2$ 和钙矾石等水化产物特征峰发生变化, $28^\circ \sim 35^\circ$ 附近与无定形凝胶相关的宽化背景逐渐增强, 说明 C-S-H 凝胶生成量不断增加。

掺入超细矿粉后, 1d 龄期两组 XRD 图谱差异较小, 说明超细矿粉早期主要发挥物理填充和晶核效应, 化学反应尚不充分。至 3d 龄期, 超细矿粉组 $Ca(OH)_2$ 特征峰相对减弱, 表明矿粉活性开始释放, 并消耗部分 CH; 同时, 矿粉细颗粒可提供更多成核位点, 促进水化产物沉积。至 28d 龄期, 超细矿粉组 CH 峰强度进一步降低, C-S-H 凝胶相关宽峰更加明显, 说明火山灰反应对中后期水化产物组成具有重要调控作用。

因此, 超细矿粉对水化过程的影响可概括为早期“填充—晶核效应”与中后期“火山灰反应”的协同作用。前者有利于改善颗粒堆积并促进水化产物成核, 后者可消耗 CH 并生成额外 C-S-H 凝胶, 从而提高浆体结构致密性。

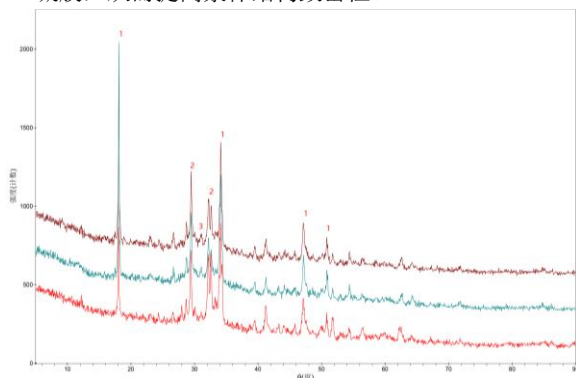


图5 普通组不同龄期 XRD 谱图

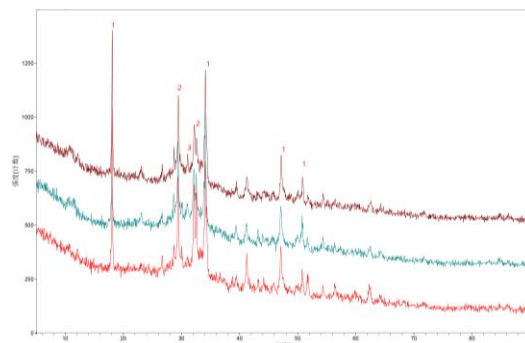


图6 超细矿粉改性组不同龄期 XRD 谱图

3.5 TG/DTG 分析

不同养护龄期的 TG/DTG 曲线如图 7 所示。通常情况下, $50 \sim 120^\circ C$ 范围内的质量损失主要与 C-S-H 凝胶、AFt 等水化产物脱水有关; $400 \sim 460^\circ C$ 附近的 DTG 峰主要对应 $Ca(OH)_2$ 分解; $600 \sim 800^\circ C$ 范围内的质量损失则主要来源于碳酸盐分解^[6,8]。

1d 龄期时, 超细矿粉组在中温阶段的质量损失低于普通组, 说明其 CH 生成量相对较少。这一现象既与部分水泥熟料被超细矿粉替代所产生的稀释效应有关, 也可能与矿粉早期表面吸附作用及初始火山灰反应消耗少量 CH 有关。7d 龄期后, 两组差异逐渐扩大, 普通组在约 $430 \sim 436^\circ C$ 附近出现较明显的 CH 分解峰, 而超细矿粉组该峰相对减弱, 表明矿粉活性逐步发挥并持续消耗 CH。

28d 龄期时, 超细矿粉组 CH 分解峰进一步减弱, 低温阶段水化产物脱水特征更加明显, 说明体系中以 C-S-H 凝胶为主的水化产物比例提高。TG/DTG 结果与 XRD 分析一致, 表明超细矿粉在中后期可通过火山灰反应优化水化产物组成, 降低大尺寸 CH 晶体含量, 从而有利于提升浆体结构稳定性和后期强度。

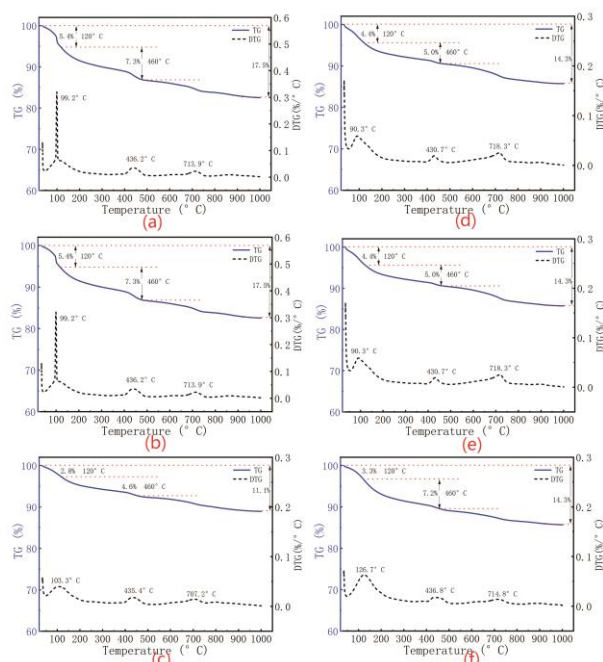


图7 普通组与超细矿粉组不同龄期 TG/DTG 曲线

(a、b、c 为普通组 1d、7d、28d; d、e、f 为试验组 1d、7d、28d)

3.6 SEM 微观结构分析

图8为普通组和超细矿粉组不同龄期的 SEM 图像。1d 龄期时,普通组中可观察到片状 CH、针状 Aft 和絮状 C-S-H 凝胶共存,基体结构仍存在一定孔隙;超细矿粉组中针状或短棒状 Aft 与凝胶产物相互交织,CH 晶体相对较少,说明超细矿粉细颗粒已对早期水化产物的形貌和分布产生影响。

7d 龄期时,普通组局部可见尺寸较大的 CH 晶体及其周围孔隙,结构均匀性仍显不足;超细矿粉组则形成较为连续的絮状和颗粒状凝胶网络,颗粒间孔隙被水化产物进一步填充,基体密实度明显提高。该现象与 TG/DTG 中 CH 分解峰减弱、XRD 中凝胶相关宽峰增强的结果相互印证。

28d 龄期时,普通组中仍可见局部未完全水化颗粒和微孔隙,而超细矿粉组水化产物分布更加均匀,C-S-H 凝胶相互搭接,形成较连续的致密结构。由此可见,超细矿粉可通过填充细化孔隙、提供成核位点以及中后期火山灰反应生成二次 C-S-H 凝胶,持续改善浆体微观结构,这是其提升后期性能的重要原因。

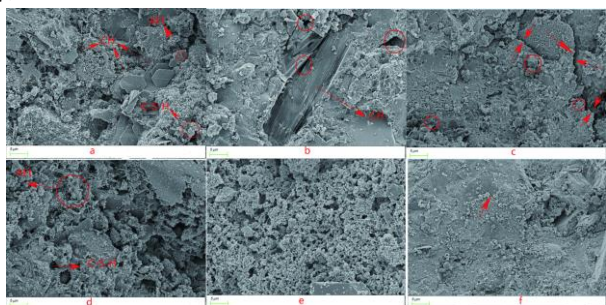


图8 普通组与超细矿粉组不同龄期 SEM 图像

参考文献:

- [1]GB/T 13476—2023, 先张法预应力混凝土管桩[S].
- [2]GB/T 50080—2016, 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S].
- [3]GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
- [4]JGJ 55—2011, 普通混凝土配合比设计规程[S].
- [5]Mehta P K, Monteiro P J M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [6]Taylor H F W. Cement Chemistry[M]. 2nd ed. London: Academic Press, 1997.
- [7]Scrivener K L, John V M, Gartner E M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 114: 2-26.
- [8]Lothenbach B, Scrivener K, Hooton R D. Supplementary cementitious materials[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1244-1256.

(a、b、c 为普通组 1d、7d、28d; d、e、f 为试验组 1d、7d、28d)

4 结论

(1)在水胶比 0.29 条件下,超细矿粉掺量由 0%增加至 40%时,混凝土坍落度基本稳定在 260~270mm,表明超细矿粉对坍落度影响较小;扩展度在 540~600mm 范围内波动,对矿粉掺量变化更为敏感。其中,10%超细矿粉掺量可使扩展度降低至 540mm,工作性更接近 PC 管桩离心成型的适宜范围。

(2)水胶比是影响混凝土早期强度的关键因素。当水胶比为 0.26 时,10%超细矿粉掺量组 1d 和 28d 抗压强度分别达到 54.23MPa 和 77.25MPa,可同时满足早期脱模和后期强度要求;30%超细矿粉掺量组亦能满足筛选指标,但早期强度安全储备相对较低。当水胶比为 0.32 时,各组 1d 强度均明显不足,不宜直接用于需快速脱模的 PC 管桩生产。

(3)综合工作性、强度发展和水泥替代效果,本文推荐水胶比 0.26、超细矿粉掺量 10%作为最优配合比;水胶比 0.26、超细矿粉掺量 30%可作为进一步降低水泥用量的备选方案,但仍需结合蒸汽养护、离心成型及生产波动试验进一步验证其工程适用性。

(4)XRD、TG/DTG 和 SEM 结果表明,超细矿粉早期主要发挥填充效应和晶核效应,中后期通过火山灰反应消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 并生成更多 C-S-H 凝胶,减少大尺寸 CH 晶体,细化孔隙结构,提高基体致密性。上述微观结构优化是超细矿粉改善 PC 管桩混凝土后期性能的主要机制。

- [9] Oey T, Kumar A, Bullard J W, et al. The filler effect: The influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 47: 46-57.
- [10] Li G, Zhao X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(3): 293-299.
- [11] Bonavetti V L, Donza H, Menéndez G, et al. Optimization of blended cements containing fly ash and ground granulated blast furnace slag[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(11): 1767-1776.
- [12] Yazıcı H, Yardımcı M Y, Aydın S, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 639-648.
- [13] Sato T, Beaudoin J J. Hydration and properties of ultra-fine ground granulated blast furnace slag cement[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(6): 623-630.
- [14] Bakharev T, Sanjayan J G, Cheng Y B. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(10): 1613-1621.
- [15] 赵铁军, 王鹏刚, 李秋义. 超细矿粉对混凝土性能影响的研究进展[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(6): 1121-1132.
- [16] 杨长辉, 叶建雄, 王冲. 超细矿粉混凝土的水化特性与微观结构[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(4): 1234-1242.
- [17] 蒋元海, 王爱勤, 张兰芳. 离心成型混凝土管桩的分层特性研究[J]. 混凝土, 2024(3): 125-128.
- [18] 高建明, 刘加平, 刘加华. 超细矿粉改性离心成型混凝土的性能研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 234-240.

作者简介: 曹震 (1998—), 男, 汉族, 本科, 职称: 钢铁专业金属材料初级职称 研究方向: 钢铁冶炼后固废资源水渣、钢渣等的绿色低碳胶凝材料产品开发及技术应用。

基金项目: 宝武集团环境资源科技有限公司科研项目 HKZ08001-03A。