



花岗岩机制砂石粉对C80高强高性能混凝土性能的影响及机理研究*

杨海成，陈 灿，范志宏

(水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室，广东 广州 510230)

摘要：为推动海工机制砂高强高性能混凝土技术的发展，系统研究花岗岩石粉对C80高强高性能混凝土工作性、力学性能、抗氯离子渗透性等性能的影响，分析石粉对混凝土性能的影响机理。研究结果表明：当机制砂石粉含量为4.5%~6.5%时，制备的C80高强高性能混凝土的工作性良好，石粉含量对新拌混凝土的屈服应力、塑性黏度等流变性能的影响不显著；随着石粉含量的增加，高强高性能混凝土力学性能先增加后降低，抗氯离子渗透性、干燥收缩呈现不断增大的趋势，但当石粉含量不超过6.5%时，对混凝土抗氯离子渗透性、干燥收缩影响幅度不明显；机制砂中适量的石粉降低了混凝土浆体孔隙率、优化了孔结构分布，有利于提高混凝土力学性能和耐久性，但石粉含量超过6.5%时，石粉对混凝土砂浆的孔结构、胶凝材料水化进程具有不利影响；C80高强高性能混凝土用机制砂石粉的含量宜控制在4.5%~6.5%。

关键词：花岗岩机制砂石粉；C80高强高性能混凝土；工作性；抗氯离子渗透性；机理

中图分类号：TU 502+.2

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)11-0013-08

Influence and mechanism of granite powder of manufactured-sand on performance of mechanical sand C80-HSHPC

YANG Hai-cheng, CHEN Can, FAN Zhi-hong

(Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology of the Ministry of Communications, Guangzhou 5102301, China)

Abstract: To promote the development of high-strength and high-performance concrete technology of marine mechanized sand in marine concrete structures, we study systematically the influence of granite powder on the workability, mechanical property, chloride ion penetration resistance of C80-HSHPC, and analyze the influential mechanism of stone powder on concrete performance. The results show that the workability of C80 HSHPC is good when the content of machine-made sand powder is between 4.5% and 6.5%, and the effect of stone powder content on the yield stress, plastic viscosity and other rheological properties of freshly mixed concrete is not obvious. With the increase of stone powder content, the mechanical properties of HSHPC increase first and then decrease. The chloride ion permeability and drying shrinkage increase continuously. However, the effect is not obvious when the content of stone powder is less than 6.5%. Appropriate amount of stone powder reduces the porosity of concrete and optimizes the distribution of pore structure. It is beneficial to improve the mechanical properties and durability of concrete. However, when the content of stone powder exceeds 6.5%, stone powder has negative effect on the hydration process and pore structure. The content powder of manufactured sand should be controlled at 4.5%~6.5%.

Keywords: granite powder of manufactured-sand; C80-HSHPC; workability; chloride permeability resistance; influential mechanism

收稿日期：2021-02-04

*基金项目：浙江省交通运输厅科技项目(2018035)；广东省重点领域研发计划项目(2019B111105002)；广东省重点领域研发计划项目(2019B111106002)

作者简介：杨海成(1982—)，硕士，高级工程师，从事海工混凝土材料、耐久性研究工作。

高强高性能混凝土具有强度高、刚度大、耐久性好等技术优点，广泛适用于高层建筑、大跨度桥梁、海港码头、海洋平台等现代工程结构，是现代混凝土技术发展的重要方向。高强混凝土的制备技术与常规普通混凝土有所不同，在原材料选取、配合比设计、施工性能等要求方面与普通混凝土有较大的差异^[1-2]。随着河砂资源的日益匮乏，机制砂制备混凝土成为未来工程建设发展的重要方向。河砂制备高强高性能混凝土已经具备较为成熟的工程实践经验，相关研究成果也在广州新电视塔及东塔、天津高银 117 大厦等市政工程中得到广泛应用^[3-5]。高强高性能混凝土在水运工程中也有应用，如高桩码头 PHC 管桩通常采用 C80 高强混凝土。此外，伴随装配式码头技术的发展，具有优异的力学性能和耐久性的高强高性能混凝土具有更广阔的应用前景。机制砂生产过程中通常产生大量 $<0.075\text{ mm}$ 石粉，石粉的主要成分与母岩化学性质基本相同。针对机制砂石粉对普通混凝土、高性能混凝土的性能影响，人们已开展大量的研究工作^[6-8]，但对于机制砂高强高性能混凝土的研究较少，尤其对 C80 及以上的机制砂高强高性能混凝土鲜有研究。为更好地指导机制砂在高强高性能混凝土的工程应用，推动海工高强高性能混凝土技术的发展，有必要深入开展机制砂高强高性能混凝土制备技术的研究工作。为此，本文对花岗岩机制砂石粉含量对 C80 高强高性能混凝土工作性、流变性、力学性能、抗氯离子渗透性及收缩特性等宏观性能开展系统研究，并采用 MIP、DSC-TG 等微观测试技术分析机制砂石粉对高强高性能混凝土性能的影响机理。

1 试验方案

1.1 原材料与混凝土配合比

采用越秀 P II 52.5 的硅酸盐水泥，7 d 和 28 d

抗压强度分别为 46.1、60.5 MPa，抗折强度分别为 7.5、9.0 MPa，初凝和终凝时间分别为 152、190 min，细度为 7.8%，氯离子含量为 0.017%，不溶物含量为 3.53%。采用广东韶钢 S95 级矿渣粉的密度为 $2.90\text{ g}/\text{m}^3$ ，比表面积为 $415\text{ m}^2/\text{kg}$ ，流动度比为 103%。采用国电谏壁电厂 I 级粉煤灰，密度为 $2.39\text{ g}/\text{m}^3$ ，细度为 9.2%，强度活性指数为 82%，烧失量为 2.71%，需水量比为 95%。硅灰的比表面积(BET 法)为 $18\text{ m}^2/\text{g}$ ， SiO_2 含量为 90.9%。采用花岗岩干法生产的机制砂的细度模数为 2.8，表观密度为 $2.63\text{ g}/\text{cm}^3$ ，堆积密度为 $1.51\text{ g}/\text{cm}^3$ ，石粉含量为 4.5%，MB 值为 0.5，吸水率为 0.5%。花岗岩石粉为采用机制砂筛除 0.075 mm 以上粒径后收集的石粉，参照 GB/T 30190—2013《石灰石粉混凝土》中石灰石粉亚甲蓝 MB 值测试方法测试的石粉 MB 值为 0.26。对比试验用河砂的堆积密度为 $1.49\text{ g}/\text{cm}^3$ ，表观密度为 $2.64\text{ g}/\text{cm}^3$ ，细度模数为 2.8，含泥量为 0.8%，轻物质含量为 0.1%，机制砂与河砂的颗粒级配如图 1 所示。水泥、矿渣粉及花岗岩石粉的化学成分如表 1 所示。粗骨料采用花岗岩生产的碎石，碎石采用 $5\sim 10\text{ mm}$ 小石与 $10\sim 20\text{ mm}$ 大石按照 4:6 比例复配使用。减水剂采用粉状高效聚羧酸减水剂。

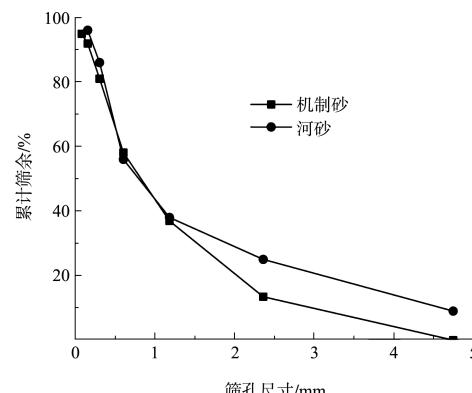


图 1 机制砂与河砂的颗粒级配

表 1 原材料的主要化学成分

原材料种类	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	f-CaO	IL	%
水泥	23.45	5.22	4.15	57.62	1.09	0.12	0.67	2.83	0.29	3.90	
矿渣粉	34.48	16.04	0.35	36.83	9.30	0.20	0.51	0.18	-	0.48	
石粉	67.21	16.93	4.08	3.54	0.34	2.88	2.69	0.07	-	0.85	

C80 机制砂高强高性能混凝土配合比见表 2。胶凝材料总掺量为 550 kg/m^3 , 采用 15% 粉煤灰、20% 矿渣粉、5% 硅灰等活性掺合料混掺, 水胶比为 0.26。利用上述基准机制砂通过筛除或添加部分石粉掺配成石粉含量为 3%、6.5% 及 8.5% 不同

石粉含量的机制砂, 利用上述不同石粉含量的机制砂形成 A1~A4 共 4 个机制砂混凝土配合比, 并采用河砂作为对比配合比 A5。通过调整外加剂的用量控制新拌混凝土的工作性, 混凝土坍落度控制在 $(23 \pm 2) \text{ cm}$ 。

表 2 不同石粉含量机制砂 C80 高强混凝土配合比

编号	水泥	粉煤灰	矿粉	硅灰	水	砂	小石	大石	减水剂	备注	kg/m^3
A1	330	82.5	110	27.5	143	699.8	437.8	656.7	3.25	石粉 3.0%	
A2	330	82.5	110	27.5	143	699.8	437.8	656.7	3.30	石粉 4.5%	
A3	330	82.5	110	27.5	143	699.8	437.8	656.7	3.35	石粉 6.5%	
A4	330	82.5	110	27.5	143	699.8	437.8	656.7	3.40	石粉 8.5%	
A5	330	82.5	110	27.5	143	699.8	437.8	656.7	3.20	河砂	

1.2 试验测试

按照表 2 配合比成型混凝土, 参照 GB/T 50080《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测试新拌混凝土坍落度、扩展度及倒置坍落度筒排空时间; 采用 Brookfield R/S-SST 流变仪测定新拌混凝土砂浆的流变性能, 包括屈服应力和塑性黏度等指标。流变仪加载过程包括预剪切阶段和数据采集阶段(图 2), 预剪切阶段为叶片以剪切率为 10 s^{-1} — 100 s^{-1} — 10 s^{-1} 的速度旋转 60 s, 恒定 10 s^{-1} 剪切 30 s, 之后为数据采集阶段, 叶片旋转速度在 75 s 内以 10 s^{-1} 线性增加到 150 s^{-1} , 然后在 75 s 内由 150 s^{-1} 线性降低到 10 s^{-1} 。

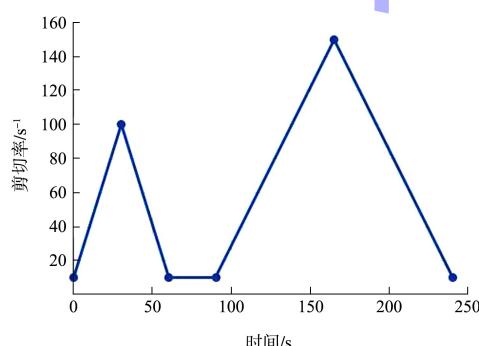


图 2 流变测试程序

在硬化混凝土性能测试方面, 首先对成型的混凝土试件标准养护 7 d 和 28 d 后参照 GB/T 50081《混凝土物理力学性能试验方法标准》测试混凝土抗压强度、劈裂抗裂强度; 参照 GB 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》测试混凝土的抗氯离子渗透性和干燥收缩。

在微观性能的测试方面, 首先制取混凝土内核砂浆, 经研磨后全部通过 $80 \mu\text{m}$ 方孔筛, 在 40°C 下真空烘干 48 h, 采用 NETZSCH 的 STA 449C 型综合热分析仪测试粉样的吸放热过程及质量变化, 试验扫描温度为 $0\sim 1000^\circ\text{C}$, 升温速度为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$, N_2 保护。取混凝土砂浆内核, 在 105°C 下的真空干燥箱中烘干 24 h 后, 在真空干燥器中冷却, 然后进行 MIP(压汞法 mercury intrusion porosimetry) 分析, 试验采用 MICROMERITICS INSTRUMENT 公司生产的 AutoPore IV 9500 全自动压汞仪测试, 仪器孔径的测量范围为 $0.003\sim 1000 \mu\text{m}$, 其中低压范围为 $0\sim 30 \text{ psi}$ ($0\sim 207 \text{ kPa}$), 高压范围为 $30\sim 60000 \text{ psi}$ ($207\sim 413700 \text{ kPa}$)。

2 试验结果与分析

2.1 花岗岩石粉对机制砂高强高性能混凝土工作性的影响

新拌混凝土工作性见表 3 及图 3。随着石粉含量的增加, 新拌混凝土对减水剂的需求增加。机制砂石粉含量对新拌混凝土的工作性具有一定的影响, 对于石粉含量为 3.5% 的机制砂高强混凝土包裹性一般。而当石粉含量增加到 8.5% 时, 新拌混凝土偏黏, 倒桶排空时间较长, 其主要是由于泵送高强机制砂混凝土胶凝材料的用量较大, 而适量的机制砂石粉含量可增加混凝土浆体的总量, 且由于石粉的颗粒效应, 适量的石粉可填充水泥、活性掺合料等胶凝材料之间的空隙,

在范德华力、静电作用下更容易相互交接构成絮凝网状结构，进而提高新拌混凝土的黏聚性和包裹性。但当石粉含量过大时，其克服浆体之间的内聚力所需要的能量也增加，造成新拌混凝土的流动性变差^[9]。除石粉含量为 3.5% 的 A1 配合

比、石粉含量为 8.5% 的 A4 配合比外，当机制砂石粉含量为 4.5%~6.5% 时，制备的机制砂高强混凝土的施工性能良好，可满足 JGJ/T 281—2012《高强混凝土应用技术规程》对泵送高强混凝土的技术要求。

表 3 石粉含量对机制砂 C80 高强混凝土工作性及流变性能的影响

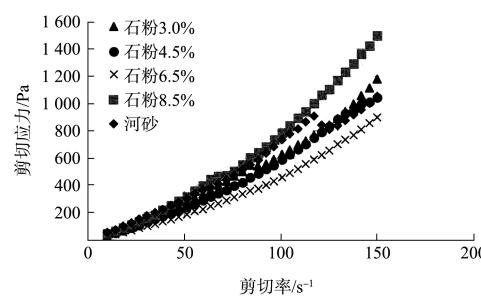
编号	坍落度/mm	坍落扩展度/mm	倒桶时间/s	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	触变性/(Pa·s ⁻¹)	工作性描述
A1	235	550	18	101.33	7.71	14 939	工作性一般，包裹性稍差
A2	250	600	16	122.65	7.34	15 002	工作性良好
A3	230	560	16	106.21	6.06	20 143	工作性良好
A4	240	590	20	180.82	10.24	20 146	工作性一般，偏黏
A5	240	500	13	47.02	7.27	10 695	工作性良好



图 3 高强机制砂混凝土的工作性

流变性能是指物质在外力作用下流动和变形的能力，以屈服应力、塑性黏度、触变性等指标定量表征。屈服应力是表征水泥浆体在发生初始流动过程中需要克服的最大阻力，阻力主要包括浆体内部颗粒之间的引力和摩擦力。塑性黏度表征的是水泥浆体内部结构阻碍浆体流动的一种性能，它反映出浆体流动速度的快慢，其大小决定于浆体内部絮凝结构的多少以及破坏程度。触变性是指在外力剪切作用下，浆体流动性会暂时增加，当外力去除后则可缓慢复原的性能，可用触变环面积表征其触变性的相对大小(图 4)。流变性能的好坏对混凝土施工操作的难易程度、施工质量等具有一定影响^[10]。不同新拌混凝土的流变性能见表 3 和图 4，不同配合比新拌混凝土的流变性符合宾汉姆流体模型，且当机制砂石粉含量不超过 6.5% 时，石粉含量对新拌混凝土屈服应力、塑性黏度的影响不显著，但石粉含量由 6.5% 增加

到 8.5% 时，新拌混凝土的屈服应力、塑性黏度显著增大，屈服应力和塑性黏度分别由 106.21 Pa、6.06 Pa·s 增加到 1 080.82 Pa、10.24 Pa·s，且随剪切率的增大，新拌混凝土剪切应力的增加幅度更为显著，但触变性的变化并不显著。机制砂石粉对混凝土流变性的影响主要有：颗粒较小的机制砂石粉可填充水泥-掺合料之间的空隙，降低浆体内部的颗粒间距，进而提高颗粒之间的附着力^[11-13]；机制砂石粉的增加提高了浆体中粉料及浆体的比重，造成浆体内实际水胶比的降低，可起到润滑作用的自由水减少，增大了颗粒间的摩擦力。上述作用均可降低新拌混凝土砂浆的流变性能。实际工程中，由于不同配合比的水胶比一致，为保证不同配合比的工作性，采用适当调整减水剂的掺量来控制新拌混凝土的工作性，随机制砂石粉含量的增加，混凝土所需的减水剂用量不断增大。减水剂的分散作用和润滑作用可破坏砂浆中的絮凝结构、释放出被包裹的水，进而降低砂浆的屈服应力、塑性黏度以及触变性^[14]。



a) 流变曲线(下降段)

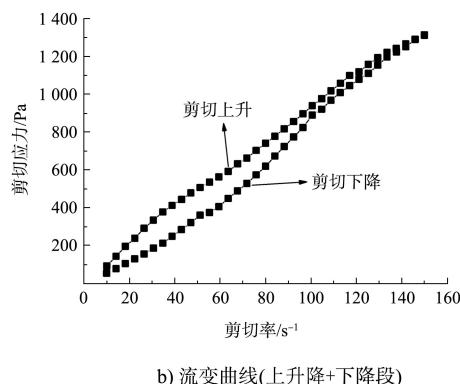


图 4 新拌混凝土中的流变特性

相比河砂制备的高强高性能混凝土, 机制砂混凝土的坍落度和坍落扩展度比河砂混凝土更大, 但倒桶排空时间也显著大于河砂混凝土。在流变性能方面, 河砂高强混凝土的屈服应力、触变性等显著小于机制砂混凝土, 主要是由于机制砂的颗粒粗糙、棱角多, 机制砂颗粒之间的摩擦力增大, 造成机制砂混凝土的屈服应力、触变性等流变性能变差^[15-16]。但当机制砂石粉含量不超过 6.5%时, 对塑性黏度的影响并不显著, 说明一定石粉含量的机制砂混凝土一旦克服初始内聚力产生流动后, 即可保持较好的流动性。因此, 本文所展现的不同石粉含量机制砂高强混凝土流变性能是上述作用的综合体现。总体上, 当机制砂石粉含量为 4.5%~6.5%时, 机制砂制备的高强混凝土工作性、流变性能等可满足现场施工性能的要求。

2.2 花岗岩石粉含量对机制砂高强高性能混凝土力学性能的影响

石粉含量对高强高性能混凝土力学性能的影响见表 4。由表 4 可知, 随机制砂石粉含量的增加, 混凝土的抗压强度、劈裂抗裂强度等力学性能总体呈先增加后减小的趋势。当石粉含量不超过 6.5%时, 随机制砂石粉含量的增加, 混凝土 28 d 的力学性能不断增大, 继续增加机制砂的石粉含量, 混凝土 28 d 的力学性能呈降低趋势, 因此, 从力学性能的角度, 高强机制砂混凝土中机制砂石粉含量不宜超过 6.5%, 但也不宜低于 3.5%。此外, 采用机制砂混凝土的抗压强度总体

要大于河砂混凝土, 但劈裂抗裂强度差异并不显著。

表 4 石粉含量对机制砂 C80 高强混凝土力学性能的影响

编号	抗压强度/MPa		劈裂抗拉强度/MPa	
	7 d	28 d	7 d	28 d
A1	77.4	85.4	5.1	5.2
A2	72.1	90.3	5.0	5.5
A3	77.8	99.5	5.3	5.6
A4	80.6	95.4	5.0	5.1
A5	78.3	83.7	5.0	5.4

2.3 花岗岩石粉含量对机制砂高强高性能混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响

石粉含量对高强高性能混凝土抗氯离子渗透性的影响见表 5。随机制砂石粉含量的增加, 机制砂高强高性能混凝土 28 d 的抗氯离子渗透性总体呈现不断增大的趋势, 但当石粉含量由 3.5%增加到 6.5%时, 混凝土 28 d 的抗氯离子渗透性增加并不显著, 氯离子扩散系数由 $0.90 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 增加到 $1.01 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 差别不明显; 而当机制砂石粉含量由 6.5%增加到 8.5%时, 高强混凝土 28 d 的氯离子扩散系数增加显著, 氯离子扩散系数由 $1.01 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 增加到 $1.84 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 对混凝土氯离子侵蚀性能的影响较为显著。对比河砂制备的混凝土, 当机制砂石粉含量不超过 6.5%时, 机制砂高强高性能混凝土的抗氯离子侵蚀性能不低于河砂混凝土。

表 5 石粉含量对机制砂 C80 高强混凝土抗氯离子渗透性的影响

编号	氯离子扩散系数/($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	7 d	28 d
A1	5.52	0.90
A2	5.62	0.99
A3	5.75	1.01
A4	5.59	1.84
A5	5.55	1.03

2.4 花岗岩石粉含量对机制砂高强高性能混凝土干燥收缩的影响

参照 GB 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中接触法测试硬化混凝土的收缩性能(图 5)。随机制砂中石粉含量的增加, 不同龄期的高强高性能混凝土干缩值总体呈现不断

增大的趋势，但当石粉含量由 3.0% 增加到 6.5% 时，机制砂高强高性能混凝土 60 d 的干缩值由 246×10^{-6} 增加到 264×10^{-6} ，增加幅度不显著。但当石粉含量由 6.5% 增加到 8.5% 时，高强机制砂混凝土 60 d 的干缩值由 264×10^{-6} 增加到 299×10^{-6} ，混凝土的干缩值显著增加。因此，为降低 C80 高强机制砂混凝土的干燥收缩，机制砂石粉含量宜不大于 6.5%。此外，相比采用河砂的混凝土，当机制砂石粉含量不大于 4.5% 时，高强机制砂混凝土的干缩值与河砂混凝土相当。适量的石粉可优化混凝土浆体颗粒分布，起到微集料填充作用，进而提高混凝土的密实性，从而对降低高强混凝土的收缩变形有益，但机制砂中过多的石粉含量将增加混凝土中浆体的比重，进而增大混凝土的干缩变形^[17]。

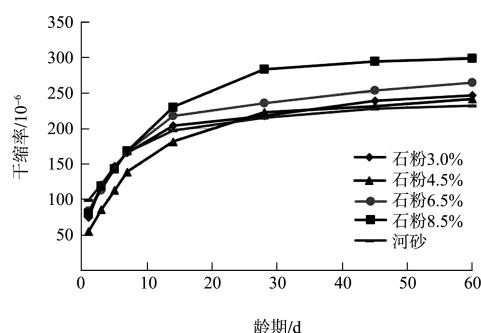
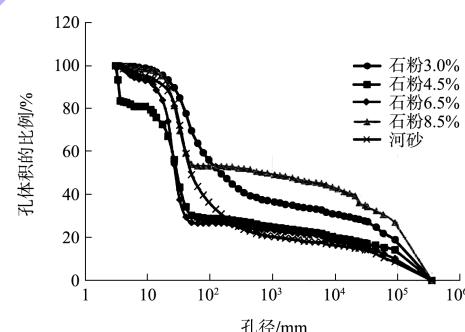


图 5 机制砂高强混凝土干燥收缩的影响

2.5 花岗岩石粉含量对高强高性能混凝土性能的影响机理

高强高性能混凝土中砂浆 28 d 的孔结构见图 6 和表 6。分析可知：随机制砂石粉含量的增加，混凝土浆体的总孔隙率呈现不断降低的趋势，当石粉含量由 3.5% 增加到 8.5% 时，混凝土浆体的总孔隙率由 8.36% 降为 5.75%；混凝土浆体的平均孔径、中值孔径随石粉含量的增加先降低后增加，当石粉含量为 4.5% 时混凝土浆体的平均孔径最小；从浆体的孔隙分布看，随机制砂石粉含量的增加，大于 200 nm 的有害孔、100~200 nm 少害孔数量呈现先减少后增大的趋势，而 20~100 nm

过渡孔及小于 20 nm 的凝胶孔总体呈先增加后减少的趋势。当石粉含量不大于 6.5% 时，石粉可优化混凝土浆体的孔结构分布，浆体中无害孔、少害孔的比例增加；但当石粉含量由 6.5% 增加到 8.5% 时，大于 200 nm 的有害孔、100~200 nm 少害孔增大，而 20~100 nm 过渡孔及小于 20 nm 的凝胶孔减少，说明机制砂中石粉劣化了混凝土中砂浆的孔结构分布，也解释了当石粉含量增加到 8.5% 时混凝土氯离子扩散系数增大的原因。对比河砂混凝土孔结构发现，河砂混凝土中砂浆的孔隙率显著大于机制砂，其主要是由于机制砂石粉可填充混凝土浆体的孔隙，提高浆体的密实性^[18-19]。微观结构决定了材料的宏观性能。对比混凝土力学性能、抗氯离子渗透性等宏观数据发现，混凝土总孔隙率与抗压强度具有较好的相关性，与氯离子扩散系数无显著的相关性，而与浆体的平均孔径、孔结构分布等有较大的影响有关（图 7）。



a) 不同孔径的孔体积比例

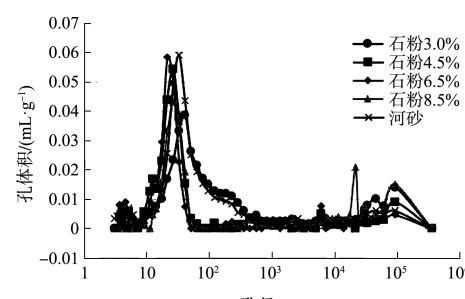


图 6 高强高性能混凝土中砂浆孔结构

表 6 高强混凝土砂浆的孔结构

编号	总孔隙率/%	平均孔径/nm	中值孔径/nm	孔隙分布/%			
				<20 nm	20~100 nm	100~200 nm	>200 nm
A1	8.36	63.6	28.6	6.63	37.41	11.01	44.95
A2	7.40	13.0	3.5	32.90	38.36	0.81	27.93
A3	5.71	23.2	17.9	25.87	47.51	0.83	25.79
A4	5.75	50.1	23.9	9.27	37.58	0.48	52.67
A5	8.90	34.5	21.3	11.76	51.99	9.41	26.85

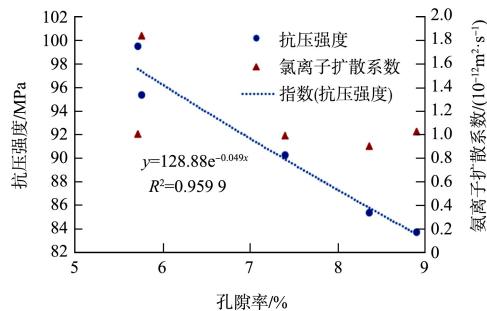
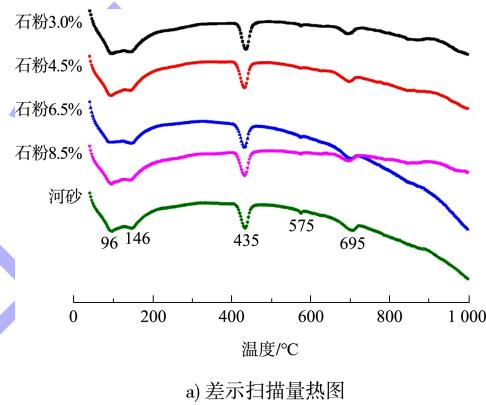


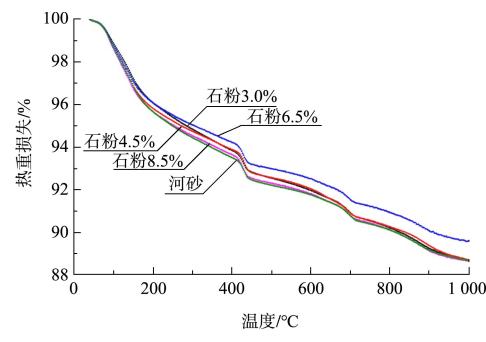
图 7 高强高性能混凝土中砂浆孔隙率与抗压强度的关系

图 8 为不同种类高强高性能混凝土中砂浆 28 d 的 DSC-TG 图谱。对于不同砂浆样品在 94~98 °C 均有明显的吸热峰, 为脱去弱结合水、自由水及单硫铝酸钙脱水等产生的重叠峰, 在 146~150 °C 区间有明显的 AFt 相吸热峰, 在 430~450 °C 区间的 CH 吸热峰, 570~575 °C 区间的游离石英吸热峰, 660~700 °C 区间的 CaCO₃ 吸热峰。根据 DSC-TG 图谱计算的不同混凝土中砂浆的 CH 含量(图 9), 当石粉含量为 3.0%~4.5% 时, 随机制砂石粉含量的增加, 混凝土砂浆中 CH 含量的变化并不显著, 但当石粉含量由 4.5% 增加到 6.5% 及 8.5% 时, 砂浆中 CH 的含量由 6.29% 分别降低为 6.08% 和 5.94%, 说明过多的石粉对水泥的水化具有一定的抑制作用。由于在胶凝材料用量、水胶比等一致的前提下, 机制砂石粉增加了混凝土中粉料的数量, 增大了粉料的比表面积, 进而吸附更多的自由水, 混凝土中自由水的降低间接影响了水泥水化进程。此外, 石粉的颗粒效应提高了混凝土浆体的密实性(见浆体孔结构), 进而压缩水泥颗粒的反应空间, 降低水泥的水化反应速度^[20~21]。根据表 1 中花岗岩石粉的化学成分可知, 其主要成分 SiO₂、Al₂O₃ 等为惰性材料, 本身并不会与混凝土中胶凝材料水化产物发生反应, 其与石灰石粉有所不同, 石灰石粉中 CaCO₃ 可与水泥中的

C3A 发生反应生成 C3A·CaCO₃·11H₂O^[22~23]。因此, 对于高强机制砂混凝土而言, 适量的机制砂石粉对优化浆体孔结构、改善混凝土力学性能及耐久性的作用更为显著, 而对胶凝材料的水化过程有一定的不利影响。



a) 差示扫描量热图



b) 热重损伤图

图 8 高强混凝土中砂浆综合热分析

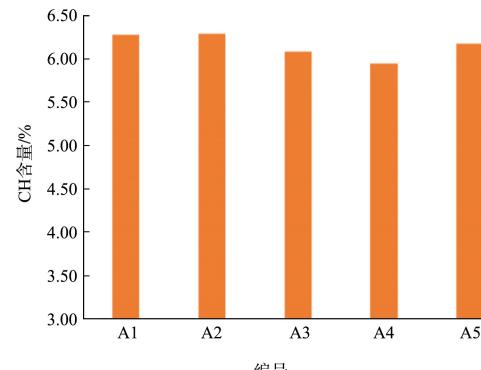


图 9 不同龄期混凝土中 CH 含量

3 结论

1) 在新拌混凝土性能方面,当机制砂石粉含量为 4.5%~6.5%时,制备的 C80 机制砂高强高性能混凝土的工作性良好,可满足 JGJ/T 281—2012《高强混凝土应用技术规程》对泵送高强混凝土的技术要求。机制砂石粉含量对新拌高强高性能混凝土的屈服应力、塑性黏度等流变性能的影响不显著,且新拌高强高性能混凝土的塑性黏度基本与河砂混凝土相当,但新拌混凝土屈服应力大于河砂混凝土。

2) 在硬化混凝土性能方面,随机制砂石粉含量的增加,高强高性能混凝土力学性能总体呈先增加后减小的趋势,机制砂石粉含量为 6.5%时制备的混凝土具有最优的力学性能;此外,随机制砂石粉含量的增加,混凝土的抗氯离子渗透性、干燥收缩呈现不断增大的趋势,但当石粉含量不超过 6.5%时,对高强高性能混凝土抗氯离子渗透性、干燥收缩影响不显著。

3) 随机制砂石粉含量的增加,混凝土浆体的总孔隙率呈不断降低的趋势,当石粉含量不超过 6.5%时,机制砂石粉优化混凝土浆体的孔结构分布,增加无害孔、少害孔的比例,有利于提高混凝土力学性能和耐久性;但当石粉含量增加到 8.5%时,机制砂中石粉对混凝土砂浆的孔结构具有劣化作用。当石粉含量超过 6.5%时,对胶凝材料的水化过程有一定的不利影响。

4) 综合考虑花岗岩石粉对 C80 高强高性能混凝土工作性、流变性、力学性能、抗氯离子侵蚀性能及干燥收缩等方面的影响,建议 C80 高强高性能混凝土用花岗岩机制砂石粉的含量宜控制为 4.5%~6.5%。

参考文献:

- [1] LI H J, HUANG F L, CHENG G Z, et al. Effect of granite dust on mechanical and some durability properties of manufactured sand concrete [J]. Construction and building materials, 2016, 109: 41-46.
- [2] 冷发光, 丁威, 韦庆东, 等. C60~C100HPC 高强高性能混凝土的试验研究 [J]. 建筑结构, 2011, 41(11):

155-158.

- [3] 覃善总, 庚明锋, 李桂青, 等. C60~C80HPC 在广州东塔超高泵送的工程应用 [J]. 混凝土, 2019(1): 132-135.
- [4] 袁启涛, 朱涵, 唐玉超. 天津高银 117 大厦 C70 高抛免振捣自密实混凝土制备及应用 [J]. 施工技术, 2015, 44(2): 27-29.
- [5] 顾国荣. 广州西塔工程 C100 及 C100 自密实混凝土配制、生产及其超高泵送技术 [J]. 混凝土世界, 2009(7): 31-41.
- [6] 杨海成, 叶小林, 盛余飞, 等. C55 砂岩机制砂混凝土在肯尼亚蒙内铁路工程中的应用 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45(7): 55-59.
- [7] 杨海成, 谭昱, 于方, 等. 砂岩石粉对砂浆力学性能及水化特性的影响 [J]. 水运工程, 2019(12): 25-31.
- [8] 张兴志, 杨海成, 于方. 基于等效龄期的机制砂高性能混凝土强度快速评价方法与工程应用 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47(9): 135-138.
- [9] 刘亚莲, 赵爽, 张志福, 等. 机制砂对混凝土流变性能的影响及机理分析 [J]. 工业建筑, 2018, 48: 314-317.
- [10] 元强, 李白云, 史才军, 等. 混凝土泵送性能的流变学表征及预测综述 [J]. 材料导报, 2018, 32: 2976-2984.
- [11] 周新文, 刘建忠, 刘光严, 等. 机制砂颗粒形状对砂浆流变性能的影响研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020, 289: 1-5.
- [12] 刘晓东. 石粉作掺合料对机制砂高性能混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2015(10): 24-26.
- [13] 田正宏, 井锦旭, 陈旭, 等. 混凝土流变参数十字搅拌轴测试方法 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 949-954.
- [14] 胡晓曼, 李亚南. C80 高石粉含量机制砂高性能混凝土试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2017(3): 27-30.
- [15] HUANG Y M, WANG L H. Effect of Particle Shape of Limestone Manufactured Sand and Natural Sand on Concrete [J]. Procedia Engineering, 2017, 210: 87-92.
- [16] SHEN W G, YANG Z G, CAO L H, et al. Characterization of manufactured sand: Particle shape, surface texture and behavior in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 595-601.
- [17] SHEN W G, LIU Y, WANG Z W, et al. Influence of manufactured sand's characteristics on its concrete performance [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 574-583.