排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2021 年 11 月 Nov. 2021 | 第 39 卷 Vol.39 第 11 期 No.11

偏高岭土对高强机制砂混凝土性能的影响

李波[1]，周海龙[1,2*]，梁玉婧[2]，何永[3]，吕志刚[3]，杨福光[3]
（1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古农业大学材料科学与艺术设计学院，内蒙古 呼和浩特 010018；3. 内蒙古路桥工程技术检测有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010051）


李波

摘要：利用扫描电子显微镜（SEM）、压汞法（MIP）、快速氯离子迁移系数法（RCM）等手段，研究了偏高岭土（MK）掺量对高强机制砂混凝土抗压强度以及抗氯离子渗透性能的影响.研究发现：掺入 MK 能够有效改善高强机制砂混凝土的力学性能和抗氯离子渗透性能：随 MK 掺量增加，抗压强度与抗氯离子渗透性能均呈先增大后减小的趋势，最佳 MK 掺量为 8%，此时 28 d 抗压强度为 98.5 MPa，较基准组增加 13%，氯离子迁移系数为 1.89×10^{-12} m^2/s，较基准组减小 60%.微观结构试验表明适宜的偏高岭土掺量能够有效促进水泥水化；偏高岭土颗粒的晶核效应和微集料填充效应协同作用，使得机制砂混凝土的微观结构更加均匀密实，机制砂混凝土的多害孔、有害孔减少，少害孔增加，从而提高了机制砂混凝土抗压强度和抗氯离子渗透性能.

关键词：高强机制砂混凝土；偏高岭土；抗压强度；孔体积；氯离子迁移系数
中图分类号：S277.1　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2021)11-1154-07
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.20.0058

李波，周海龙，梁玉婧，等. 偏高岭土对高强机制砂混凝土性能的影响[J].排灌机械工程学报，2021，39(11)：1154-1160.

LI Bo，ZHOU Hailong，LIANG Yujing，et al. Effect of metakaolin content on performance of high strength manufactured sand concrete[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2021，39(11)：1154-1160.（in Chinese）

Effect of metakaolin content on performance of high strength manufactured sand concrete

LI Bo[1]，*ZHOU Hailong*[1,2*]，*LIANG Yujing*[2]，*HE Yong*[3]，*LYU Zhigang*[3]，*YANG Fuguang*[3]
（1. Water Conservancy and Civil Engineering College，Inner Mongolia Agricultural University，Hohhot，Inner Mongolia 010018，China；2. College of Material Science and Art Design，Inner Mongolia Agricultural University，Hohhot，Inner Mongolia 010018，China；3. Inner Mongolia Road and Bridge Group Co. Ltd.，Hohhot，Inner Mongolia 010051，China）

Abstract：The effects of metakaolin（MK）content on the compressive strength and resistance to chloride ion penetration of high strength manufactured sand concrete were studied by using scanning electron microscope（SEM），mercury intrusion method（MIP），and rapid chloride ion mobility coefficient（RCM）methods. The study finds that the addition of MK can effectively improve the mechanical properties and resistance to chloride ion penetration of high strength manufactured sand concrete. With the increase of the amount of MK，both the compressive strength and the resistance to chloride ion penetration increase first and then decrease. The optimal MK content is 8%. At this time，the 28-day compressive strength is 98.5 MPa，which is increased by 13% compared with the benchmark group，and the chloride ion migration coefficient is 1.89×10^{-12} m^2/s，which is 60% lower than the benchmark

收稿日期：2020-03-11；**修回日期**：2020-05-25；**网络出版时间**：2021-10-29
网络出版地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20211029.1033.014.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51569021)；内蒙古自然科学基金资助项目(2020MS05076)；内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZZ16057)；内蒙古自治区研究生教育教学改革研究与实践项目(YJG20181012902)
第一作者简介：李波(1993—)，男，内蒙古巴彦淖尔人，助理工程师，硕士研究生(libo199332@126.com)，主要从事机制砂混凝土研究.
通信作者简介：周海龙(1981—)，男，内蒙古乌兰察布人，副教授，在站博士后(ndsjyzhl@126.com)，主要从事新材料与新结构体系研究.

group. The microstructure test shows that the appropriate amount of metakaolin can effectively promote cement hydration. The synergistic effect of MK particle nucleation effect and micro aggregate filling effect of metakaolin particles makes the microstructure of the machined sand concrete more uniform and dense. The number of harmful holes and harmful holes of manufactured sand concrete are reduced, and fewer harmful holes are increased, and thereby improving the compressive strength and resistance to chloride ion penetration of the sand concrete.

Key words: high strength manufactured sand concrete; metakaolin; compressive strength; pore volume; chloride ion migration coefficient

鉴于天然砂资源短缺和国家对生态环境保护的重视，机制砂代替天然砂配制混凝土已成为行业发展的必然趋势.中国早期将高强机制砂混凝土主要用于水利工程中，例如三峡大坝、湖北宣恩洞坪水利枢纽、皂市水利枢纽等工程.现今在很多的道路桥梁工程中也广泛应用高强机制砂混凝土[1].但混凝土破坏形式一直是学者们关注的问题，尤其在水利工程中，水下混凝土所处环境更加恶劣，其混凝土的劣化也有很多表现形式，常见的有物理破坏、化学侵蚀和钢筋锈蚀等.氯离子侵蚀是引起钢筋锈蚀的重要因素之一，如果混凝土能够有效地阻止外界环境的离子侵入，钢筋锈蚀现象发生的机会将会大大降低[2-3].所以在高强机制砂混凝土的应用过程中，除强度外，抗氯离子渗透性能研究也是一个重要的课题.

目前，一般向机制砂混凝土中添加矿物掺合料以提高混凝土强度及氯离子抗渗性.常用的矿物掺合料有粉煤灰、矿渣粉和硅灰等.硅灰被认为是活性最高的矿物掺合料[4-5].但中国的硅灰产量低、价格高、生产耗能大，寻求一种能替代硅灰且能工业化生产的活性矿物掺合料就显得尤为重要.

高岭土是以高岭石为主要成分的黏土矿物.高岭土在一定温度(600~900 ℃)下煅烧、脱水可形成白色粉末状的偏高岭土(MK)[6].MK 主要成分为 SiO_2和 Al_2O_3，两者的含量在 90%以上.MK 能够与水泥的水化产物氢氧化钙反应生成水化铝酸钙、C-S-H 等胶凝物质，可以有效控制碱集料反应，发挥出较高的火山灰活性，改善混凝土的强度、抗渗性和耐腐蚀性等性能[7-9].因此，近些年很多学者[10-12]将 MK 作为一种新型矿物掺合料应用到普通混凝土中，但将其应用到高强机制砂混凝土中的研究成果很少见.

文中通过粉煤灰和 MK 复掺，配制出满足 C80 要求的高强机制砂混凝土，同时研究 MK 掺量对机制砂混凝土抗压强度及抗氯离子渗透性能的影响.并且进一步研究掺 MK 的机制砂混凝土内部微观形貌及孔隙结构.该研究成果可为推动 MK 掺合料在高强机制砂混凝土中的应用提供一些参考.

1　试　验

1.1　原材料

水泥(OPC)：内蒙古天皓水泥集团有限公司生产的 P.O52.5 水泥，比表面积为 489.93 m^2/kg，密度为 3.081 g/cm^3；粉煤灰(FA)：内蒙古京能热电有限公司生产的Ⅱ级粉煤灰，比表面积为 234.02 m^2/kg，密度为 2.19 g/cm^3；偏高岭土(MK)：内蒙古超牌建材有限公司生产的偏高岭土，比表面积为 33 600 m^2/kg，密度为 2.67 g/cm^3.3 种胶凝材料的化学成分见表 1，表中 ω 为各成分的质量分数.

利用动态纳米激光粒度分析仪分析了偏高岭土的颗粒分布情况，如图 1 所示，图中 d 为粒径，ω_1 和 ω_2 分别为累计质量分数、分计质量分数；图中平均粒径为 571 nm.

利用场发射扫描电子显微镜分析了粉煤灰与偏高岭土颗粒的微观结构，如图 2 所示.由此可以看出，粉煤灰是由大量球形颗粒组成，偏高岭土呈现聚集簇状结构.

表 1　试验用水泥、粉煤灰及偏高岭土的化学组成
Tab.1　Chemical composition of test cement, fly ash and metakaolin

材料	ω/%								
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2
水泥	23.00	5.70	60.00	1.90	2.90	5.50	0.50	0.20	0.30
粉煤灰	53.40	32.20	5.80	1.50	1.10	4.50	0.60	0.90	—
偏高岭土	54.26	42.86	0.26	0.25	—	0.41	0.78	0.91	0.27

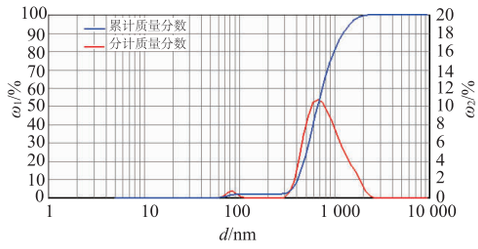
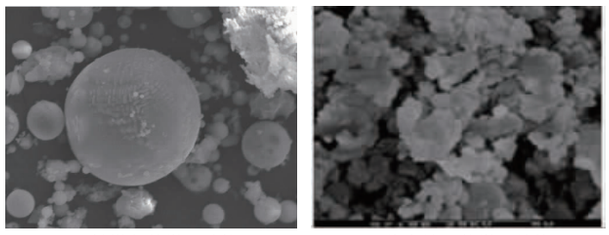


图 1 偏高岭土粒径分布图

Fig.1 Particle size distribution diagram of MK

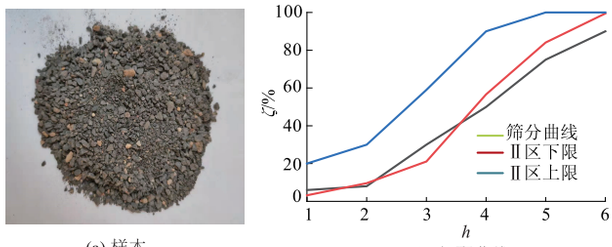


(a) 粉煤灰的微观结构 (b) 偏高岭土的微观结构

图 2 粉煤灰和偏高岭土的微观结构图

Fig.2 Microstructure diagram of FA and MK

碎石与机制砂采用内蒙古乌兰察布市卓资山内蒙古路通石材有限公司生产的玄武岩集料.碎石粒径为 5~20 mm 连续级配,压碎值为 11.83%,孔隙率为 37.5%.机制砂的各项指标:细度模数为 3.23,压碎值为 12.15%,氯化物质量分数为 0.001 1%,硫化物与硫酸盐质量分数为 0.143%,含泥质量分数为 0.91%,石粉质量分数为 1.1%,吸水率为 2.45%,碱集料反应为 0.08%,表观密度为 2 928 kg/m^3,紧密堆积密度为 1 651 kg/m^3;其样本形貌和颗粒级配曲线见图 3 所示,图中 h 为筛孔号,分别代表筛孔尺寸为 0.15,0.30,0.60,1.18,2.36,4.75 mm;ζ 为通过率.减水剂采用江苏点石生产的聚羧酸减水剂(标准型),各项指标:减水率为 23%,泌水率比为 48.7%,含气量为 2.7%,初凝时间为 65 min,终凝时间为 45 min.调节剂采用长沙益友建筑科技有限公司生产的机制砂混凝土调节剂,各项指标:密度为 1.005 g/cm^3,外观为浅黄色液体,硫化物质量分数<2%,pH 值为 10,建议掺量为 2%~4%(质量分数).



(a) 样本 (b) 级配曲线

图 3 机制砂的样本与级配曲线图

Fig.3 Sample and grading curves of manufactured sand

1.2 配合比设计

《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)中推荐砂率为 35%~42%,又根据经验得出合理砂率一般较碎石孔隙率大 5%~7%,故本次试验选定的砂率为 42%.根据试拌选定水胶比为 0.33,减水剂根据试拌最终确定掺量为胶材用量的 1.7%.MK 的掺量为胶材用量的 5%,8%,10%,15%;粉煤灰掺量为胶材用量的 10%,矿物掺合料均等量替代水泥,其他材料用量保持一致.各组详细的配合比见表 2,表中 τ 为水胶比,ρ 为体积质量,ω 为质量分数.

表 2 机制砂混凝土的配合比

Tab.2 Mix ratio of manufactured sand concrete

编号	τ	ρ/(kg·m^{-3})					ω/%			
		胶凝材料	水泥	水	机制砂	碎石	FA	MK	减水剂	调节剂
MK0	0.33	500	450	165	754.3	1 041.7	10	0	1.7	3
MK5	0.33	500	425	165	754.3	1 041.7	10	5	1.7	3
MK8	0.33	500	410	165	754.3	1 041.7	10	8	1.7	3
MK10	0.33	500	400	165	754.3	1 041.7	10	10	1.7	3
MK15	0.33	500	375	165	754.3	1 041.7	10	15	1.7	3

注:FA 为粉煤灰;MK 为偏高岭土,其值即为偏高岭土掺量

1.3 试验方法

1) 抗压强度试验.参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),立方体抗压强度试验在时代试金(YAW-2000D)微机控制电液伺服压力试验机上进行.每个配比测试 3 个样品,测试龄期分别为 7,28,56,112 d.

2) 微观试验.电镜试验(SEM)采用日本 Hitachi 公司 S-4800 型场发射扫描电子显微镜进行微观形貌分析,放大倍率为 20~800 000 倍,测定 MK0,MK5,MK8,MK10,MK15 共 5 组 28 d 龄期混凝土微观形貌,测试前需将小块混凝土试件放置在 60±5 ℃的烘箱中烘干至恒质量.

压汞试验(MIP)采用美国麦克仪器公司的 AutoPorelV 9500 全自动压汞仪,最大压力为 413.7

MPa，可测孔径范围为 3 nm～360 μm，使用其测定上述 5 组 28 d 龄期下混凝土内部孔隙等特征参数.

3）抗氯离子渗透试验.通过快速氯离子迁移系数法（或称 RCM 法）测定混凝土中氯离子渗透，按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082—2009），采用试样尺寸为 φ100 mm×50 mm圆柱体，测定龄期为 28 d，每组的氯离子迁移系数取 3 个试样的平均值.试验结束后，擦去试件表面多余水分，在压力试验机上沿轴向劈成 2 个半圆柱体，在劈开的试件断面立即喷涂浓度为 0.1 mol/L 的 $AgNO_3$溶液显色指示剂，约 15 min 后可观察到明显的颜色变化，测量显色分界线即可获得氯离子渗透深度.

氯离子迁移系数计算式为

$$D_{RCM}=\frac{0.023\ 9(273+T)L}{(U-2)t}\left(X_d-0.023\ 8\sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}}\right),\tag{1}$$

式中：D_{RCM}为氯离子迁移系数，m^2/s；U 为所用电压绝对值，V；T 为阳极溶液初终温度平均值，℃；L 为试件厚度，mm；X_d为氯离子渗透深度平均值，mm；t 为试验持续时间，h，不同试件可能持续时间不同.

2　试验结果与分析

2.1　抗压强度

图 4 为不同 MK 掺量的机制砂混凝土在不同龄期下试件的抗压强度试验结果，图中 σ 为抗压强度，ω_{MK}为 MK 掺量.结果表明：MK 能够有效改善机制砂混凝土的力学性能.随着掺量的增加，机制砂混凝土的抗压强度呈现先增加后减小的趋势.其中 MK 掺量为 5%，8%，10%时，试件 28 d 抗压强度分别为 97.5，98.5，96.9 MPa，这 3 组均满足 C80 高强机制砂混凝土的强度要求.与不掺偏高岭土的机制砂混凝土相比，当 MK 掺量为 8%时，不同龄期下的机制砂混凝土抗压强度均达到最大值，7，28，56，112 d 各龄期的增幅分别为 6.1，11.5，12.1，13.7 MPa.由此可以看出，随着龄期增加，机制砂混凝土的抗压强度增幅逐渐加大.

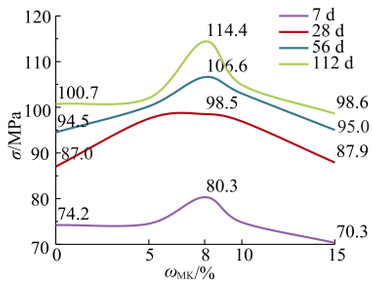


图 4　MK 掺量对机制砂混凝土抗压强度的影响

Fig.4　Effect of MK content on compressive strength of manufactured sand concrete

2.2　抗氯离子渗透

图 5 和 6 为不同 MK 掺量下，机制砂混凝土试件的抗氯离子渗透试验结果，图中 D_{RCM}为氯离子迁移系数.MK0，MK5，MK8，MK10 这 4 组试验持续时间均为 24 h；MK15 组试验持续时间为 48 h.试验结果表明：机制砂混凝土的氯离子渗透深度及迁移系数随 MK 掺量增加呈现出先减小后增加的趋势.掺入适量 MK 后，氯离子迁移系数和渗透深度都明显降低.

和不掺相比，当 MK 掺量为 8%时，氯离子迁移系数的降幅最大，达到 59%，之后随着 MK 掺量增加，氯离子迁移系数又逐渐增大.因此，掺 8% MK 时，机制砂混凝土抗氯离子渗透性能达到最优.

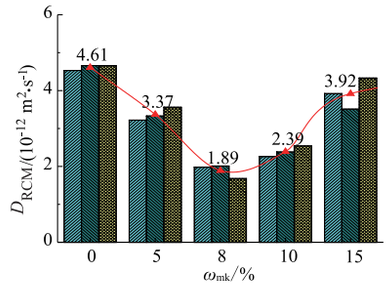
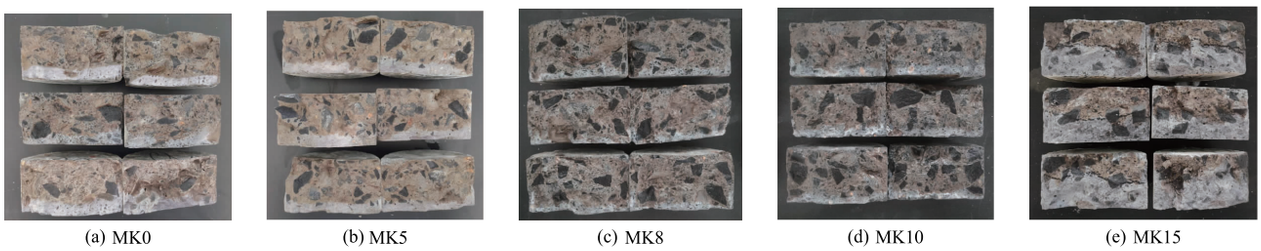


图 5　MK 掺量对机制砂混凝土氯离子迁移系数的影响

Fig.5　Effect of MK content on chloride ion mobility coefficient of manufactured sand concrete



(a) MK0　(b) MK5　(c) MK8　(d) MK10　(e) MK15

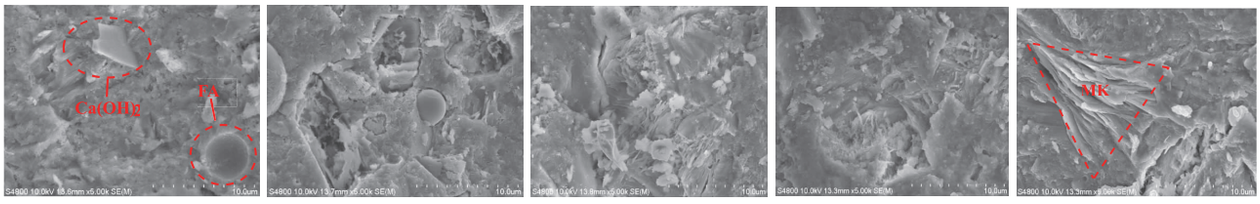
图 6　不同 MK 掺量下机制砂混凝土中氯离子渗透深度图示

Fig.6　Penetration depth diagram of chloride ions in manufactured sand concrete with different MK content

2.3 电镜试验(SEM)分析

图 7 为不同 MK 掺量机制砂混凝土 28 d 龄期下试件的微观形貌图.在 MK0 组中,孔隙较多,还可以看到少量板状 $Ca(OH)_2$ 晶体和完全裸露在外的粉煤灰颗粒;在 MK5 组中,水化结构较疏松且有半裸露在外的粉煤灰颗粒;在 MK8 和 MK10 组中,$Ca(OH)_2$ 晶体较少,水化较完全,试件内部的凝胶结构形成了一个致密的整体;在 MK15 组中,试件结构水化完全但存在聚集在一起的条缕状 MK.理论上,MK 在 C-S-H 凝胶的生成过程中起到晶核的作用,熟料颗粒表面生成的水化产物在 MK 晶核表面优先沉积,使得熟料颗粒表面以下未反应,熟料能够继续与水接触而水化,更多的晶核形成点既加快了水化速度,又使得水化产物结构更加致密[13],因此掺入 MK 的机制砂混凝土,抗压强度及抗氯离子渗透均得到大幅提升.但当 MK 的掺量过大时,由于超细粉过多,混凝土流动性下降,且骨料间过量细粉聚集时,会使得骨料间形成滑动面导致其咬合力下降,见图 7e 中,三角区域为 MK 聚集区.因此,大掺量 MK 机制砂混凝土密实性和抗压强度都受到一定的负面影响.

通过 SEM 微观形貌图分析,可以看出试件内部微观形貌与抗压强度和抗氯离子渗透宏观试验结果相吻合.



(a) MK0 (b) MK5 (c) MK8 (d) MK10 (e) MK15

图 7 28 d 机制砂混凝土试样 SEM 图

Fig.7 SEM image of 28 d manufactured sand concrete sample

2.4 压汞试验(MIP)

为了进一步印证 MK 对机制砂混凝性能的影响,通过 MIP 试验对混凝土内部孔隙结构进行分析.MIP 试验中的孔体积(mL/g)是指在一定外力作用下进入试样中的液态汞体积与试样质量的比值[14-15].图 8 为不同 MK 掺量下 28 d 龄期试件内部的孔径与孔体积关系,图中 b 为孔径,V_f 为分计孔体积.根据吴中伟等[16]对混凝土内孔的分级,将孔分为 4 级:无害孔级(< 20 nm)、少害孔级(20 ~ 50 nm)、有害孔级(50 ~ 200 nm)和多害孔级(>200 nm).

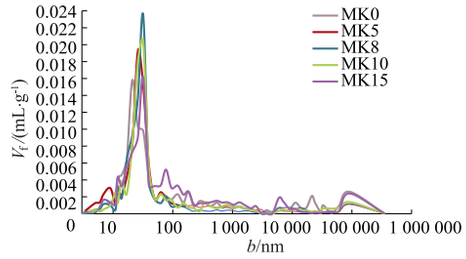


图 8 不同 MK 掺量下机制砂混凝土对应的分计孔体积

Fig.8 Scoring pore volume corresponding to manufactured sand concrete with different MK content

按照文献[16]对混凝土内部孔的等级划分,可将图 8 转化为图 9,图中 V 为孔体积.从图 9 中可知,随着 MK 掺量增加,机制砂混凝土中多害孔和有害孔呈先减小后增大的趋势,少害孔呈先增大后减小的趋势.METHA[17]认为,只有大于 100 nm 的孔才影响混凝土的强度和抗氯离子渗透,小于 50 nm 的孔数量能反映凝胶数量的多少,而凝胶数量越多则混凝土强度越高,抗氯离子渗透性能越好.因此,通过 MIP 孔隙结构分析,可以看出试件内部各孔径孔体积分布趋势与抗压强度和抗氯离子渗透宏观试验结果趋势相吻合.

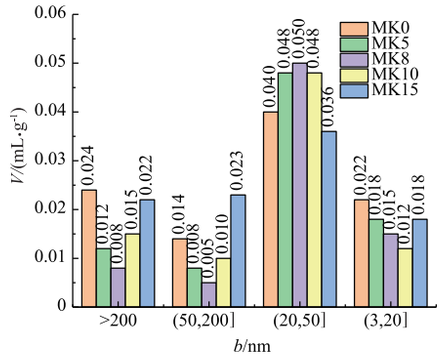


图 9 不同 MK 掺量下机制砂混凝土的孔径分布

Fig.9 Pore size distribution of manufactured sand concrete with different MK content

图 10 为试样总孔体积与 MK 掺量的关系,图中 V_t 为总孔体积,可以看出 MK 的掺入对试样总孔体

积影响明显.随着 MK 掺量增加，试样总孔体积整体上呈先减小后增大的趋势.

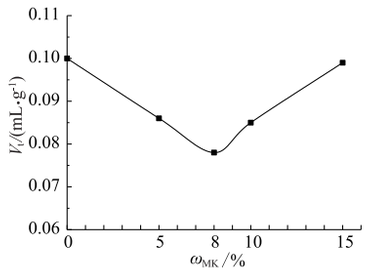


图 10　总孔体积与 MK 掺量的关系

Fig.10　Relationship between total pore volume and MK content

图 11 为试样 28 d 抗压强度和氯离子迁移系数分别与总孔体积的关系.随着总孔体积增大，试样的 28 d 抗压强度整体逐渐减小，呈负相关，相关系数为 0.941 6；试样的氯离子迁移系数整体逐渐增大，呈正相关，相关系数为 0.882 4.

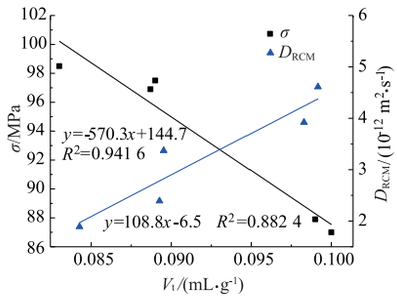


图 11　抗压强度/氯离子迁移系数与总孔体积的关系

Fig.11　Relationship between compressive strength / chloride ion migration coefficient and total pore volume

因此，可以看出 MK 在机制砂混凝土材料体系中能发挥良好的尺寸效应，形成固体颗粒的密实堆积和填充作用，进一步细化混凝土的孔径分布，提高机制砂混凝土抗压强度和抗氯离子渗透性能.但 MK 优势作用不是随着掺量增大而无限增大，当 MK 的掺量过大时，超细粉过多，密实性产生负面影响，导致机制砂混凝土抗压强度和抗氯离子渗透性能下降.

3　结　论

1）通过力学试验和抗氯离子渗透试验得出，掺入 MK 能够有效改善机制砂混凝土的力学性能和抗氯离子渗透性能.随 MK 掺量增加，机制砂混凝土 7，28，56，112 d 抗压强度均呈先增大后减小趋势，机制砂混凝土 28 d 抗氯离子渗透性能也呈先增大后减小趋势，并且当 MK 掺量为 8%时，抗压强度和抗氯离子渗透性能均达到最优.

2）通过扫描电镜试验得出，MK 掺合料可促进水泥水化，能够降低水化产物中 $Ca(OH)_2$ 晶体含量，提高水化凝胶的含量，提高水化产物的密实度.当 MK 掺量为 8%和 10%时，混凝土内部水化较彻底，结构较致密.

3）通过压汞试验得出，MK 可以改善胶凝材料的级配，以起到填充效应与微集料效应.适量地掺入 MK 能够有效减少机制砂混凝土中多害孔和有害孔的孔体积，增加机制砂混凝土中少害孔的孔体积.试样中总孔体积随 MK 掺量增加呈先减小后增大的趋势，当 MK 掺量为 8%时，总孔体积最小.试样的抗压强度与总孔体积负相关，试样的氯离子迁移系数与总孔体积正相关.

综上，通过微观与宏观试验相结合，印证出试件内部微观形貌、孔隙结构与抗压强度和抗氯离子渗透性能的发展趋势相吻合.由此可以得出 C80 高强机制砂混凝土的最优 MK 掺量为 8%.

参考文献(References)

[1] 蒋正武，梅世龙.机制砂高性能混凝土[M].北京：化学工业出版社，2015：11.

[2] HOSSAIN K M A, LACHEMI M. Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete[J]. Cement and concrete research, 2007,37(5):759-766.

[3] SONG Ha-Won, KWON Seung-Jun. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure[J]. Cement and concrete research, 2007,37(6):909-915.

[4] 杨凤玲，嵇银行，李玉寿，等.偏高岭土对混凝土性能影响研究[J].混凝土与水泥制品，2011,31(5):4-8.
YANG Fengling, JI Yinhang, LI Yushou, et al. Study on the effect of metakaolin on concrete performance[J]. China concrete and cement products, 2011,31(5):4-8.(in Chinese)

[5] 王宝民，刘伟.偏高岭土对高性能混凝土力学性能影响试验研究[J].公路交通科技，2010,27(9):126-129.
WANG Baomin, LIU Wei. Research on mechanical property of high performance concrete with metakaolin [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2010,27(9):126-129.(in Chinese)

[6] 刘红彬，盛星汉，唐伟奇，等.偏高岭土高性能混凝土

的强度和抗氯离子渗透性研究[J].公路,2015,60(2):180-184.
LIU Hongbin, SHENG Xinghan, TANG Weiqi, et al. Effect of metakaolin volume on the strength and resistance to chloride ion permeability of high performance concrete[J]. Highway, 2015,60(2):180-184.(in Chinese)

[7] TEBBAL N, RAHMOUNI Z E A. Rheological and mechanical behavior of mortars with metakaolin formulation [J]. Procedia computer science, 2019,158:45-50.

[8] ZENG Junjie, SHUI Zhonghe, WANG Guiming. The early hydration and strength development of high-strength precast concrete with cement/metakaolin systems[J]. Journal of Wuhan University of Technology (materials science), 2010,25(4):712-716.

[9] 钱晓倩,詹树林,李宗津.掺偏高岭土的高性能混凝土物理力学性能研究[J].建筑材料学报,2001,4(1):75-78.
QIAN Xiaoqian, ZHAN Shulin, LI Zongjin. Research of the physical and mechanical properties of the high performance concrete with metakaolin [J]. Journal of building materials, 2001,4(1):75-78. (in Chinese)

[10] 莫宗云,白力改,王大光,等.偏高岭土对超高性能混凝土性能的影响研究[J].非金属矿,2018,41(6):30-32.
MO Zongyun, BAI Ligai, WANG Daguang, et al. Effect of metakaolin on the properties of ultra high performance concrete[J]. Non-metallic mines, 2018,41(6):30-32.(in Chinese)

[11] 余强,曾俊杰,范志宏,等.偏高岭土和硅灰对混凝土性能影响的对比分析[J].硅酸盐通报,2014,33(12):3134-3139.
YU Qiang, ZENG Junjie, FAN Zhihong, et al. Comparative analysis on influence of metakaolin and silica fume on concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014,33(12):3134-3139. (in Chinese)

[12] RAMEZANIANPOUR A A, JOVEIN H B. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes [J]. Construction and building materials, 2012,30(5):470-479.

[13] 陈益兰,赵亚妮,李静,等.偏高岭土替代硅灰配制高性能混凝土[J].硅酸盐学报,2004,32(4):524-529.
CHEN Yilan, ZHAO Yani, LI Jing, et al. High performance concrete with metakaolin mixed replacing of silica fume[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004,32(4):524-529. (in Chinese)

[14] 杨文萃.无机盐对混凝土孔结构和抗冻性影响的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.

[15] PIPILIKAKI P, BEAZI-KATSIOTI M. The assessment of porosity and pore size distribution of limestone portland cement pastes [J]. Construction and building materials,2009,23(5):1966-1970.

[16] 吴中伟,廖慧珍.高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社,1999:171-172.

[17] MEHTA P K. Studies on blended portland cements containing santorin earth [J]. Cement and concrete research, 1981,11(4):507-518.

(责任编辑 张文涛)