

水泥混凝土浆体-集料界面区结构与性能

王振军, 沙爱民

(长安大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710061)

摘要: 混凝土浆体-集料界面区结构与性能影响混凝土的整体性能, 是混凝土材料研究的热点之一。针对水泥混凝土浆体-集料界面区结构与性能特点, 从混凝土界面区结构、性能、研究手段、改善方法及其对水泥混凝土性能影响等方面, 综述了国内外水泥混凝土浆体-集料界面区结构与性能研究进展。总结了界面区结构特征与性能影响因素及微观和宏观两种界面区研究手段, 分析界面区结构与性能差异原因及对混凝土整体性能影响程度, 概括了矿渣粉和偶联剂等无机和有机两类界面区结构与性能改善方法, 最后, 提出混凝土界面区结构与性能研究重点和方向。

关键词: 水泥混凝土; 浆体-集料界面区; 结构; 性能

中图分类号: TU528.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-7329(2008)06-0155-06

Structure and Performance of the Interface Zone between Mortar and Aggregate in Cement Concrete

WANG Zhen-jun, SHA Ai-min

(School of Material Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China)

Abstract: The interface zone between mortar and aggregate influences overall performance of concrete and is an important issue for concrete research. Focusing on the structure and performance characteristics of the interface zone in cement concrete, the development of interface research in P. R. China and elsewhere were reviewed. The research aspects discussed included interface structure and performance, study techniques, interface improvement methods, and the influence of the interface on overall concrete performance. The influential factors of structural characteristics and interface zone performance, together with both microscopic and macroscopic research techniques, were summarized. The reasons for differences in interface zone structure and performance, and its degree of influence on the overall concrete performance were analyzed. Methods for improving the interface zone were generalized, including using an interface with slag powder as inorganic material and one with an organic coupling agent. Keys to research and future directions were proposed.

Key words: cement concrete; interface zone between mortar and aggregate; structure; performance

在水泥混凝土中, 浆体-集料界面区是水泥混凝土的薄弱环节, 其结构与性能的好坏直接决定水泥混凝土的强度、收缩、徐变以及扩散和渗透等力学性能和耐久性能等整体性能的优劣, 近年来, 国内外对其进行了大量研究^[1-3]; 然而, 受研究手段、取样方法、试件尺寸等条件限制, 得到的混凝土界面区结构与性能特点及其对混凝土整体性能影响规律也不尽相同, 采用的试验技术也多种多样。因此, 总结水泥混凝土界面区结构与性能研究的相关成果对于进一步加深或改善混凝土

浆体-集料界面区的研究具有重要意义。

1 浆体-集料界面区结构与性能

1.1 浆体-集料界面区结构

早在1905年, Sabin等^[4-6]就意识到了复合材料的界面问题; 后来, Farran^[7]从岩相学、矿物学以及晶体学等多方面调研后发现, 在浆体与集料之间的区域, 水化产物的组成及形貌与基体部分不同, 结构相对疏松, 强度较低。1980年第7届国际水泥化学会议把“界面粘附和耐久性”列为7个主题之一。1986年第8届国

* 收稿日期: 2008-03-23

基金项目: 长安大学科技发展基金(2008Q2)

作者简介: 王振军(1978-), 男, 工学博士, 主要从事土木工程材料等方面的研究。(E-mail) wjzolan@163.com
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

际水泥化学会议把“界面粘结和耐久性”列为 12 个主题之一。在 1992 年、1995 年、1996 年和 1999 年都有国际性有关界面专题报告会,并提出来许多新颖的观点和先进的界面研究相关的技术手段。另,Shah^[8]研究了影响高性能混凝土界面区性能的因素,提出拔出法测定界面区力学性能,并建立了界面区结构模型。

吴中伟^[9]提出混凝土中不同层次的“中心质假说”和“中心质效应”的概念,如图 1 所示。把混凝土中的粗集料看作大中心质,认为集料界面的作用是多种性质作用的综合表现,在粗集料和浆体之间存在一个厚度约 50~100 μm 的“过渡层”,其结构疏松,对混凝土性能不利,应当减小其厚度,以提高混凝土的性能。

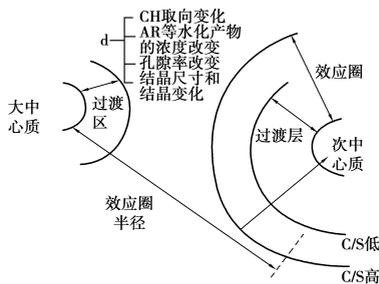


图 1 中心质效应示意图

巴恒静^[10]研究了粉煤灰、硅灰、纳米 SiO_2 与水泥水化反应产物的早期界面显微结构,探讨了 3 种微粉与水泥水化反应的机理及对改善界面结构的作用,并提出了“二级界面”的概念。对水泥混凝土二级显微界面进行了研究,得出来二级界面的显微结构、孔结构及二级界面对水泥基混凝土性能的影响,认为二级界面的改善能够较大程度的提高混凝土的耐久性能。

孙伟^[11-12]探讨了在多因素交互作用下,有关界面研究方面存在的不足;概括介绍了目前国际上存在的几种界面结构模型,分新拌混凝土阶段和水化早期、材料硬化过程中以及材料使用过程中 3 个阶段描述了界面结构的形成以及劣化机理,给出了几种常规的以及可能成为界面结构的表征方法,从原材料的物理、化学组成,配合比以及材料制备工艺角度分析了影响界面结构的因素;采用正 12 面体模型研究了集料尺寸分布和集料体积分数对平均最邻近集料表面间距的影响;用 3 种规则形状(球形、椭圆形截面以及矩形截面)的集料为例,从几何概率角度研究了截面分析法对界面厚度的放大问题;采用具有粒子动态混合密实功能的 SPACE 系统,模拟了高集料体积分数混凝土的结构。

总之,界面区结构的研究主要是了解界面区形貌及矿物组成与基体的差别,以便提出界面区结构模型,并了解界面区结构形成机理与影响界面结构的因素。对于水泥基复合材料界面区结构的研究已持续了几十年,在国际上也提出了几种典型的界面区结构模型^[13-14],如

Metha 模型(图 2)、解松善模型^[15]等(图 3)。

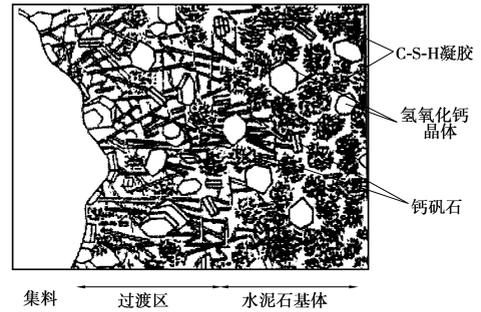


图 2 Metha 模型

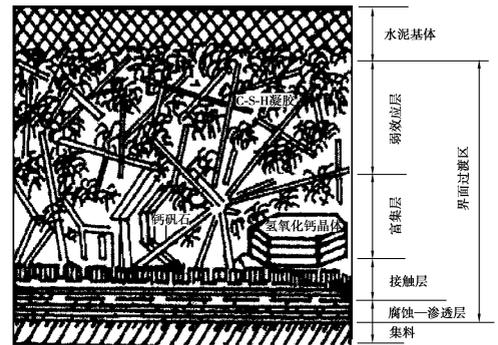


图 3 解松善模型

1.2 浆体-集料界面区性能

由国外研究现状来看,从微观角度即浆体与集料界面性能的研究出发来研究混凝土宏观路用性能已成了一种新途径,一种必然趋势,因此,把握界面区性能非常重要。国外对不同因素下水泥基复合材料集料与浆体界面性能做了大量研究工作。

文献^[16-18]报道了多种不同矿物组成的集料与水泥浆体之间的力学性能,认为集料的矿物组成和表面结构会影响到水化产物,如氢氧化钙(CH)和钙矾石(Aft)的成核生长,从而影响到界面区的结构,进而影响到界面区的力学性能。Lagerblad 等^[19]发现钙质集料会影响水泥的水化,如方解石(Calcite)和钙硅石(Wollastonite)使诱导期变短,而石灰石会与水泥水化释放出的 CH 发生反应,惰性集料表面经过活化处理的集料会与水泥的水化产物进行反应^[20],使界面区的密实度增加,界面粘结强度提高。在特定的碱度环境以及温度条件下,某些一般情况下属于非活性的集料,也会发生反应。Bentz^[21]发现尺度较小的胶凝材料粒子在混合过程中易于在较粗糙的集料表面堆积,使得临近集料表面的 $5\mu\text{m}$ 区域内的密实度提高。对于同种集料而言,由于机械咬合作用,表面光滑的集料与浆体之间的粘结强度低于表面粗糙的集料与浆体之间的界面粘结强度。多孔集料自身的孔隙率、饱水程度以及毛细管现象等都会影响到界面区的形成过程。

Stroeven^[22]的模拟结果显示,界面区的厚度随胶凝材

料细度的增加而减小,同时也发现胶凝材料中的细颗粒易于在集料表面附近堆积,水泥的粒径分布不但影响到浆体的稳定性而且影响到水泥的水化过程以及界面区的性能。Scrivener^[23]根据未水化水泥含量沿集料表面的分布情况发现,界面区的厚度随水化的延续而增加,其性能变化较大。Garboczi^[24]的模拟结果则认为界面区的性能随着水化过程的进行而变化,但界面区的厚度基本保持不变。Trende^[25]对集料的粗糙程度对水泥混凝土界面区性能的影响进行了研究,认为粗糙的集料表面有利于混凝土界面区抗剪能力的提高。Salter^[26-27]研究了集料抗压强度、耐磨性、形状等物理性能对混凝土界面性能的影响。Tasong^[28]运用SEM和X衍射(XRD)研究了集料质地对界面区性能的影响,认为石灰岩在界面区的化学反应导致了界面区较大孔隙率的产生,影响界面区性能。Amir^[29]运用SEM研究了水灰比、集料尺寸和养护龄期对界面区的性能的影响,认为水灰比影响界面区的性能,集料尺寸越小,越能够减小界面区的孔隙率,养护龄期越长,孔隙率越小,界面区性能越好。总之,由于原材料性能、试验条件、试验方法等因素影响界面区性能,不同文献之间有关界面区性能的结论也不一致。

1.3 浆体-集料界面区结构与性能对混凝土性能影响

Lee^[30]通过选定混凝土典型浆体-集料界面,对界面的断裂韧度进行评价,并通过分析,将界面断裂韧度参数与混凝土断裂韧度参数联系起来。Mier^[31]运用点阵断裂模型,结合集料形状、岩性及破碎状况等因素,分析界面性能对混凝土应力-应变性能的影响;认为混凝土力学性能的提高主要取决于界面的断裂性能,与集料本身的力学性能没有太大关系,完全可以通过提高界面力学性能的方法,提高混凝土的整体力学性能;最后提出了使界面区力学性能由弱到强的决定因素的合理比例。

孙伟^[32]从力学性能、传输性能和收缩性能3个角度阐述了界面对混凝土宏观性能的影响,其中力学性能主要从强度、刚度以及断裂力学性能3个方面,传输性能主要从扩散性能与渗透性能两个方面进行考虑。张君^[33]采用有限元方法,通过计算能量释放率并与材料断裂韧性对比,对弯曲荷载下骨料-水泥石界面区域裂纹走向进行分析判定;对于给定骨料的混凝土,随着混凝土抗压强度的增大,弯曲型裂纹和穿透性裂纹两种裂纹走向的能量释放率之比呈逐渐减小趋势,而界面与集料的断裂韧性之比则逐渐增大。喻乐华^[34]应用界面理论分析混凝土强度与各类粗细集料界面之间的关系,着重讨论混凝土强度的最薄弱部位-粗集料界面区的影响因素。周明凯^[35]采用显微硬度仪研究混凝土浆体-集料界面的显微硬度和显微硬度与混凝土

流动性与强度之间的关系,对其机理进行研究。

可以看出,混凝土性能不同,界面区结构与性能区别较大;不同的界面区结构与性能又会影响到混凝土的整体性能,但界面区结构与性能到底在多大程度上影响到混凝土性能这一问题值得深入研究。

2 浆体-集料界面区结构与性能的研究手段及改善方法

2.1 浆体-集料界面区结构与性能的研究手段

混凝土界面区性能研究的技术手段在试验研究方法方面从最早 Farran 采用光学显微镜观测到水泥砂浆集料与水泥浆体之间界面区的存在开始,后来 SEM、XRD、压汞法(MIP)以及交流阻抗谱方法以及计算机模拟方法被陆续引用进来。Mitsui^[36]用 SEM 观察水泥基材料二级界面情况,用能谱仪(EDAX)对样品作元素定性分析,用 EPMA 进行背散射图像研究。Valeri^[37]用 XRD 研究界面区硅酸盐水化产物的结构和晶体结构,并从理论角度提出了集料形状、岩相成分对界面区性能的影响结论。Lin^[38]采用超声回弹的方法测定混凝土界面区内浆体-集料的粘结性能。Nilsen^[39]采用 SEM、电子探针(EPMA)等微观手段研究了矿物掺合料物理、化学性能对界面区性能的影响。

张云升^[40]应用环境扫描电镜(ESEM)原位定量追踪 K-PSDS 型地聚合物水泥混凝土在相对湿度 80% 条件下界面区水化产物演化过程及生存性能。钟世云^[41]用有效介质理论研究了聚合物改性砂浆界面的电导特性;利用一个将骨料看成非电导球形颗粒的混凝土模型,计算了界面区的电导率与水泥浆基体电导率的比值。水中和^[42]利用 SEM、EPMA 和 EDAX 对老混凝土中骨料-水泥界面区的成份分布及影响情况进行研究,认为界面区内部和外部的的水化产物组成存在一定的差别,表现在 Ca、K 和 Fe 等元素富集于界面区,而 Si 元素在此区域的含量相对较低,由此可以推测混凝土界面区性能及混凝土的整体性能。马一平^[43]采用浆体-集料分离的方法,通过宏观界面劈裂试验,模拟研究了提高普通混凝土中水泥石-集料界面粘结强度的途径,认为浅烧处理大理石集料,集料表面涂以硅烷偶联剂或丁苯胶乳,以低水灰比浆体包裹集料等途径,均可使水泥石-集料界面粘结强度得以大幅度提高,并对提高水泥石-集料界面粘结强度的机理进行了讨论。

可以看出,对于混凝土界面区结构与性能的研究,有效手段较多,既有微观测试设备,亦有宏观方法模拟,但如何保证微观条件下试件的代表性和宏观条件下模拟的真实性等问题值得研究。

2.2 浆体-集料界面区结构与性能的改善方法

矿渣粉通过“火山灰效应”能够改善混凝土界面区结构与性能。Hoshino^[44]对比掺加矿渣粉石灰混合物的混凝土与未掺加的混凝土,发现前者强度明显高于后者,分析发现掺加矿渣粉的混凝土界面区中非晶状的水化硅酸钙(C-S-H)明显增多,矿渣粉加快了硅酸三钙(C₃S)、铝酸三钙(C₃A),特别是铁铝酸四钙(C₄AF)的水化速度,较早产生较多的水化产物,提高混凝土强度。Uchikawa^[45]用矿渣粉代替混凝土部分细集料,发现混凝土拌合物粘聚性和抗压强度增加,原因在于矿渣粉的火山灰反应产生较多的胶凝产物,填充混凝土内部孔隙,增加其强度。Stevula^[46]研究发现在水泥、矿渣粉与集料界面处,除基本水泥水化产物外,还存在典型的类钙硅凝胶物质,发现在界面处Mg和S元素的存在及其对水泥水化的影响是出现以上现象的主要原因。另外,硅粉和粉煤灰的“火山灰效应”对混凝土界面区结构与性能亦有较好改善作用。

偶联剂等高聚物对混凝土界面区结构与性能具有改善作用。Chawalwala^[47]在聚合物混凝土中掺加硅烷偶联剂,发现能够提高聚合物与集料界面粘附性能,明显提高混凝土的抗水损害能力,改善混凝土整体性能。Sveg^[48]发现掺加氨基偶联剂砂浆的抗弯强度和对集料粘附性能提高,而干缩性能降低。俞巧珍^[49]的试验结果表明,在玻璃纤维织物表面涂覆硅烷偶联剂有利于它与水泥基体间界面粘结,改善它们间的界面行为。李北星^[50]的试验结果表明,水泥经N-β(氨基)-γ-氨基丙基三甲氧基硅烷偶联剂改性后,抗弯、抗压强度、断裂韧性和微区硬度提高,孔隙减少,结构致密。另外,羧基丁苯等聚合物乳液也能够明显改善水泥混凝土界面区结构与性能。

3 结 语

国内外对于水泥混凝土浆体-集料界面区结构与性能的研究已持续了几十年,要在宏观技术的基础上,探索微观试验技术,并借鉴其他学科的试验方法,进行新的试验技术的创新。建议结合以下3个问题,进行重点研究:1)各种层次的界面区到底在多大程度上影响着混凝土的整体性能;2)通过改善界面区结构与性能来达到改善混凝土性能这一措施是否可行;3)界面区生成产物以什么形式存在,其对混凝土整体性能有多大影响。

可以结合以下4点思路开展混凝土界面区相关研究工作:1)当代基础科学研究已有可能对于材料进行严密的理论分析,进一步说,就是在认真分析材料组分、结构的基础上,深入阐明材料结构与性能间的相互关系,进而做到按指定性能设计和制造材料,这是当代

材料科学发展的总趋势,也是混凝土材料科学必然要走的道路。因此,保证混凝土界面区结构与性能研究的准确性已具备条件且相当重要;2)在有效试验技术基础上,借鉴其他学科的试验技术,如医学中的CT技术,能够从试件整体进行界面区结构的分析,而不是单纯地拿出界面区进行研究,减少微小界面区取样不均所带来的问题;3)要注意界面区结构与性能的量化,可以采用一些数学方法,如分形理论等,尽量使衡量指标明确化,以便于从量的角度对浆体-集料界面区结构与性能进行改善和对混凝土整体性能影响规律的研究;4)近年来,水泥乳化沥青混凝土、聚合物混凝土等新型混凝土得到应用,扩展混凝土浆体-集料界面区结构与性能研究范围,即加强对于有机-无机复合混凝土界面区结构与性能、影响因素发生机理及界面结构与性能对混凝土整体性能影响等方面的研究非常必要。

参考文献:

- [1] OTSUKI NOBUAKI, NISHIDA TAKAHIRO, WATANACHAI PITIWAT, et al. Experimental study on influence of ITZ around aggregate on Cl⁻ diffusivity of concrete[J]. Journal of the Society of Materials Science, 2006, 55(10): 899-904.
- [2] MIRANDA DIAS, JOSE LUIS. Cracking due to shear in masonry mortar joints and around the interface between masonry walls and reinforced concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(2): 446-457.
- [3] BUYUKOZTURK ORAL, HEARING BRIAN. Improving the ductility of high performance concrete through mortar-aggregate interfaces[C]// Proceedings of the 1996 4th Materials Engineering Conference. Washington, DC, 1996: 1337-1346.
- [4] MINDNESS SABIN. Bonding in cementitious composites: how important is it[C]// Bonding in Cementitious Composites, Materials Research Society Symposia Proceedings. Pittsburgh: Materials Research Society, 1998, 114: 3-10.
- [5] SCRIVENER KAREN L, CRUMBIE, ALISON K, LAUGESEN PETER. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete[J]. Interface Science, 2004, 12(4): 411-421.
- [6] PROKOPSKI G, HALBINIAK J. Interfacial transition zone in cementitious materials[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(4): 579-583.
- [7] FARRAN J. The transition zone discovery and development[C]// Interfacial transition zone in Concrete, RILEM Report. London, 1996, X III-XV.
- [8] SHAH S P, LI Z, LANGE D A. Properties of aggregate-cement interface for high performance concrete[C]// Proceedings of Engineering Mechanics. New York, 1992: 852-855.
- [9] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.

社, 1999.

- [10] 巴恒静,冯奇,杨英姿. 复合微粒高性能混凝土的二级界面显微结构及耐久性研究[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11):1043-1047.
BA Heng-jing, FENG Qi, YANG Ying-zi. Research on properties and secondary interface microstructure of high performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(11):1043-1047.
- [11] 陈惠苏,孙伟, Stroeven Pie. 计算混凝土中平均最邻近集料表面间距的正十二面体模型[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11):1048-1052.
CHEN Hui-su, SUN Wei, Stroeven Pie. Regular dodecahedron model to calculate the average surface spacing between the nearest neighboring aggregate grains in concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(11):1048-1052.
- [12] 陈惠苏,孙伟,赵庆新. 混凝土中邻近集料表面最近间距分布的计算机模拟[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(4): 429-435.
CHEN Hui-su, SUN Wei, ZHAO Qing-xin. Computer simulation of the nearest surface distance distribution between neighbor aggregate grains in concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(4):429-435.
- [13] ZAMPINI D, SHAH S P. Early age microstructure of the paste-aggregate interface and its evolution[J]. Journal of Materials Research, 1998, 13(7):1888-1898.
- [14] BENTUR A, OLDER I. Development and nature of interfacial microstructure[R]. Interfacial Transition Zone in Concrete. RILEM Report II, London, 1996: 18-44.
- [15] 解松善. 水泥基复合材料中界面粘结的研究[J]. 硅酸盐学报, 1983, 11(4):489-497.
XIE Song-shan. Study of interface adhesion in the cement based composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1983, 11(4):489-497.
- [16] ALEXANDER M G. Two experimental techniques for studying the effects of the interfacial zone between cement paste and rock [J]. Cement Concrete Research, 1993, 23(3):567-575.
- [17] ALEXANDER M G. Aggregate and the deformation properties of concrete [J]. Journal of ACI Material, 1996, 93(6):569-577.
- [18] TANDNGW A, LYNDALECL, CRIPPSJ C. Aggregate-cement chemical interactions [J]. Cement Concrete Research, 1998, 28(7):1037-1048.
- [19] LAGERBLAD B, KJELLENSEN K O. Effect of mineralogy of filler on cement hydration[C]//The Modelling of Microstructure and Its Potential for Studying Transport Properties and Durability. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1996:157-165.
- [20] SHENY, XUZ, XIEP. A new method of enhancing cement-aggregate interfaces: An ideal aggregate and its effects on interfacial microstructures[J]. Cement Concrete Research, 1992, 22(4):612-618.
- [21] BENTZ D P, GARBOCZI E J. Experimental and simulation studies of the interface zone in concrete[J]. Cement Concrete Research, 1992, 22(5): 891-902.
- [22] STROEVEN P, STROEVEN M. Reconstructions by space of the interfacial transition zone[J]. Cement Concrete Composites, 2001, 23(2/3):189-200.
- [23] SCRIVENER K L. Characterization of the ITZ and its quantification by test methods [C]//Engineering and Transport Properties of the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites. Cachan, 1999:3-15.
- [24] GARBOCZI E J, BENTZ D P, DIGITA J. Simulation of the aggregate-cement paste interfacial zone in concrete [J]. Journal of Material Research, 1991, 6:196.
- [25] TRENDE U, BUYUKOZTURK O. Size effect and influence of aggregate roughness on interface fracture of concrete composites [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(4):331-338.
- [26] SALTER RICHARD J, EI-MANSY NABIL M. Some effects of aggregate characteristics on asphalt mixtures [J]. Highways (England), 1998, 933(56):53-54.
- [27] XIE PING, BEAUDOIN J J, BROUSSEAU R. Flat aggregate-portland cement paste interfaces II. transition zone formation [J]. Cement and Concrete Research, 1991, 21(5):718-726.
- [28] TASONG WILLIAM A, LYNDALE CYRIL J, CRIPPS JOHN C. Aggregate-cement paste interface: part I. influence of aggregate geochemistry[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 1019-1025.
- [29] ELSHARIEF AMIR, COHEN MENASHI D, OLEK JAN. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(11): 1837-1849.
- [30] LEE, KWANG-MYONG, BUYUKOZTURK, ORAL. Fracture toughness of mortar-aggregate interface in high-strength concrete[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(6):634-642.
- [31] VAN MIER, J G M, VERVUURT A. Numerical analysis of interface fracture in concrete using a lattice-type fracture model[J]. International Journal of Damage Mechanics, 1997, 6(4): 408-432.
- [32] 陈惠苏,孙伟, Stroeven Pie. 水泥基复合材料界面对材料宏观性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(1):51-62.
CHEN Hui-su, SUN Wei, Stroeven Pie. Review on the study of effect of ITZ on the macro properties of cementitious composite [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(1):51-62.

- [33] 张君,刘骞,王林. 混凝土内裂纹沿水泥石/骨料界面或穿透骨料发展的条件[J]. 清华大学学报, 2004, 44(3): 387-390.
ZHANG Jun, LIU Qian, WANG Lin. Conditions promoting crack growth in concrete along the aggregate/matrix interface or into the aggregate[J]. Journal of Tsinghua University, 2004, 44(3): 387-390.
- [34] 喻乐华. 混凝土集料界面与强度关系的界面理论分析[J]. 华东交通大学学报, 1999, 16(4): 14-19.
YU Le-hua. Analysis on relation between interfaces in concrete and its strength on the interface theory[J]. Journal of East China Jiaotong University, 1999, 16(4): 14-19.
- [35] 周明凯,王稷良,关爱军. 辉绿岩混凝土的强度与界面特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(3): 40-43.
ZHOU Ming-kai, WANG Ji-liang, GUAN Ai-jun. Study for the strength and interface characteristic of the diabase aggregate concrete[J]. Journal of Wuhan University, 2004, 26(3): 40-43.
- [36] MITSUI KENRO, LI ZONGJIN, LANGE DAVID A, et al. Relationship between micro-structure and mechanical properties of the paste-aggregate interface[J]. ACI Materials Journal, 1994, 91(1): 30-39.
- [37] HARUTYUNYAN VALERI S, ABOVYAN EDWARD S, MONTEIRO PAULO J M, et al. X-ray diffraction investigations of microstructure of calcium hydroxide crystallites in the interfacial transition zone of concrete[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2003, 86(12): 2162-2166.
- [38] LIN JIUNN MING, SANSALONE, MARY. Impact-echo studies of interfacial bond quality in concrete: part I-effects of unbonded fraction of area[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(3): 223-232.
- [39] NILSEN U, SANDBERG P, FOLLIARD K. Influence of mineral admixtures on the transition zone in concrete [C]//Proceedings of the International RILEM Conference. Toulouse, 1993: 65.
- [40] 张云升,孙伟,林玮,等. 用环境扫描电镜原位定量追踪K-PSDS型地聚合物混凝土界面区的水化过程[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(8): 806-810.
ZHANG Yun-sheng, SUN Wei, LIN Wei, et al. In Situ quantitatively tracking the hydration process of interfacial transition zone between coarse aggregate and K-PSDS geopolymers matrix with ESEM[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(8): 806-810.
- [41] 钟世云,王培铭,陈志源. 聚合物改性砂浆界面过渡区的电导特性[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(10): 1235-1240.
ZHONG Shi-yun, WANG Pei-ming, CHEN Zhi-yuan. Electrical conductivity in interfacial transition zone of polymer modified mortars[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(10): 1235-1240.
- [42] 水中和,万惠文. 老混凝土中骨料-水泥界面过渡区(界面过渡区)(I)-元素与化合物在界面过渡区的富集现象[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(4): 21-24.
SHUI Zhong-he, WAN Hui-wen. Aggregate-cement interfacial transition zone (ITZ) in old concrete (I)-concentrations of element sand compounds to the ITZ [J]. Journal of Wuhan University, 2002, 24(4): 21-24.
- [43] 马一平. 提高水泥石-集料界面粘结强度的研究[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(1): 29-32.
MA Yi-ping. Study of improving adhesion strength between cement mortar and aggregate interface[J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(1): 29-32.
- [44] HOSHINO, SEIICHI, YAMADA KAZUO, HIRAO HIROSHI. XRD/Rietveld analysis of the hydration and strength development of slag and limestone blended cement[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(3): 357-367.
- [45] UCHIKAWA HIROSHI, HANEHARA SHUNSUKE, HIRAO HIROSHI. Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(1): 101-111.
- [46] STEVULA L, MADEJ J, KOZANKOVA J, et al. Hydration products at the blast furnace slag aggregate cement paste interface[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 24(3): 413-423.
- [47] CHAWALWALA A J, McCULLOUGH R L, PALMESE G R. Effect of silane coupling agents on the durability of polymer concrete[C]//Proceedings of the American Society for Composites. Atlanta, 1996, 10: 211-221.
- [48] SVEG FRANC, SUPUT STRUPI, JERNEJA. Use of aminosilane coupling agents in cementitious materials [C]//Macromolecular Symposia. Weinheim, D-69451, Germany. 2005, 211: 153-164.
- [49] 俞巧珍. 硅烷偶联剂对玻璃织物/水泥复合材料界面行为的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(6): 914-916.
YU Qiao-zhen. Influence of the silane coupling agent on the interfacial behavior of glass fabric / cement composite [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2004, 22(6): 914-916.
- [50] 李北星,何真,梁文泉. 硅烷偶联剂改性MDF水泥的水敏性研究[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(3): 262-264.
LI Bei-xing, HE Zhen, LIANG Wen-quan. Water sensitivity of macro-defect-free cement modified with silane cross-coupling agent[J]. Materials Science & Technology, 2003, 11(3): 262-264.

(编辑 王秀玲)