

文章编号:1671-8879(2008)04-0001-06

水泥乳化沥青混凝土胶浆-集料界面微观结构

沙爱民^{1,2}, 王振军¹

- (1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061;
2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:论述了水泥乳化沥青混凝土性能及胶浆-集料界面微观结构的研究进展,探讨了界面微观结构研究中存在的问题,提出了水泥在界面微观结构中的功能,展望了界面微观结构的研究方法和发展方向。研究结果表明:胶浆-集料界面微观结构直接影响混凝土整体性能,水泥能够明显改善界面微观结构;应针对有机和无机结合料共同特点,综合现行微观试验手段,建立胶浆-集料界面微观结构模型,通过界面微观结构全面预测和改善混凝土宏观路用性能。

关键词:道路工程;水泥乳化沥青混凝土;胶浆-集料界面;微观结构;综述
中图分类号:U414.75 **文献标志码:**A

Microstructure of mastics-aggregate interface in cement emulsified asphalt concrete

SHA Ai-min^{1,2}, WANG Zhen-jun¹

- (1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;
2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The advances of cement emulsified asphalt concrete performance and mastics-aggregate interface microstructure were presented, some problems in study on interface microstructure were discussed, the functions of cement in interface microstructure were put forward, the study methods and the developing trends of interface microstructure were reviewed. The researches show that mastics-aggregate interface microstructure has a direct influence on the whole performances of cement emulsified asphalt concrete and cement has an evident improvement on interface microstructure. According to the coexist traits of the organic binder and the inorganic binder, with the help of the current microstructure test apparatuses, a mastics-aggregate interface microstructure model must be developed in order to predict and improve the macroperformance of cement emulsified asphalt concrete by the interface microstructure. 2 figs, 31 refs.

Key words: road engineering; cement emulsified asphalt concrete; mastics-aggregate interface; microstructure; review

收稿日期:2007-08-05

基金项目:陕西省交通科技项目(00-18G)

作者简介:沙爱民(1964-),男,安徽宣城人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:aiminsha@263.net.

0 引言

无论是从路面的整体性能要求方面,还是从节能环保要求方面,都希望得到性能不受温度和水分的影响、行车舒适性好、易于维修、能够在常温甚至低温下成型、成型能耗低以及污染小的节能环保材料,也就是说,希望得到兼有沥青混凝土和水泥混凝土优点的材料。水泥乳化沥青混凝土便是以此为目的研究开发的以有机-无机复合结合料为特征的路面材料。

水泥乳化沥青混凝土以水泥和乳化沥青为结合料,能够在常温条件下施工,具有较高的强度和较好的韧性。近几年,国内外对该材料进行了研究,主要集中于混凝土的设计方法、拌和方式、成型工艺以及混合料宏观性能评价^[1-3]。目前,虽然能够实现水泥乳化沥青混凝土路面的现场成型,但是路用性能并不理想,主要表现在材料整体均匀性差、粘结强度较低、路面的平整度差以及耐久性不足等。

因为水泥乳化沥青混凝土以水泥和乳化沥青为结合料,所以两者的作用不同于纯粹的水泥和沥青;单纯地进行宏观性能的研究难以掌握混合料性能的变化规律和机理,特别是两种结合料在胶浆-集料界面内的存在形式与单纯的水泥和沥青差别较大,致使界面结构与水泥混凝土或沥青混凝土大不相同,而界面结构直接影响混凝土的整体性能。国内外对水泥混凝土和沥青混凝土材料界面进行了大量研究,但鲜见水泥-乳化沥青结合料共存条件下的界面结构研究。为此,本文对水泥乳化沥青胶浆-集料界面微观结构进行了深入研究。

1 混凝土性能及界面微观结构功能

1.1 水泥乳化沥青混凝土性能

Bayomy^[4]运用水泥裹浆的方法,将裹一层水泥胶浆的集料用于沥青混凝土中,以提高混凝土的刚性和强度。该方法最早源于日本,水泥裹的粗骨料用于水泥混凝土中,以增大粗骨料与水泥胶浆的粘结力,从而提高混凝土的整体强度。Aiqadi 等^[5]对水泥乳化沥青混凝土的稳定性、抗拉强度、抗压强度、回弹模量、水敏感性、冻融性和抗 Cl^- 腐蚀性能进行了研究。Darwin^[6]对水泥乳化沥青混凝土的疲劳、强度、刚性、温度敏感性和应力-应变关系进行了研究。沙爱民^[7]在水泥-乳化沥青复合结合料性能研究基础上,研究了水泥、乳化沥青等原材料性质对水泥乳化沥青混凝土路用性能的影响,提出了水

泥乳化沥青混凝土材料组成设计方法和相应的配合比设计方法,给出了水泥乳化沥青混凝土路用性能的技术参数;对水泥乳化沥青混凝土成型工艺进行了深入研究,提出了水泥乳化沥青混凝土强度形成机理,认为水泥的存在增加了胶浆-集料界面结构的复杂性,水泥利用乳化沥青破乳产生的水分发生水化,生成的水化硅酸钙(C-S-H)等胶凝材料对于胶浆-集料界面结构和胶浆本身产生了一定影响。徐培华等^[8]研究了半刚性路面面层材料马歇尔稳定度、低温弯拉、收缩、高温车辙及疲劳特性等路用性能指标,初步探讨了半刚性面层材料强度形成机理,认为胶结材料与集料的界面性质对面层材料的各种技术性能有很大的影响,同时提出了半刚性面层材料的施工方法及路面结构组合方案。

总之,国内外对水泥乳化沥青混凝土进行了较多研究,但重点在于其宏观路用性能或成型及施工方法,对其微观性能和界面微观结构研究相对较少。

1.2 胶浆-集料界面微观结构功能

沥青-集料界面是沥青混凝土结构组成的决定性因素,它直接影响到沥青混凝土高温稳定性、水稳定性和结构强度等一系列重要性能,沥青路面的病害多与沥青-集料界面粘结不佳有密切关系。试验研究表明,将表面涂敷沥青的集料颗粒浸泡水中,由于水具有很强的表面张力和浸润性,水可以通过沥青自发的乳化作用进入并穿透沥青膜侵入沥青和矿料的界面,并最终将沥青膜取代,所以在水的作用下沥青易从集料表面剥落而发生水损害。分析雨水进入沥青与集料界面的路径发现,如果能在裹附集料的沥青中形成一层障碍,将渗入路面内部的雨水部分拦截于障碍之外,能极大降低对界面上沥青与集料粘附力的要求。水泥有遇水迅速硬化的性质,如果将水泥颗粒均匀地分布在集料表面的沥青中,当有破坏作用的水分子渗入沥青并进一步向界面渗透时,就会与水泥颗粒结合而水化。在水分子持续渗入沥青的情况下,沥青中的水泥水化产物会逐渐增多,并相互搭接形成多道由内向外逐渐增强的屏障,阻碍水分子向界面的渗入,会降低对界面上沥青与集料粘附力的要求。因此,水泥乳化沥青混凝土中水泥的存在,能够改善混凝土胶浆-集料界面微观结构功能。

2 胶浆-集料界面微观结构研究现状

2.1 胶浆-集料界面微观结构

Scrivener 等^[9]早就意识到复合材料的界面问

题;Parran^[10]从岩相学、矿物学、晶体学等多方面调研后发现,在胶浆与集料之间的区域,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年第七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年第八届国际水泥化学会议把“界面粘附和耐久性”列为12个主题之一。在1992年、1995年、1996年、1999年都有国际性的有关界面专题报告会,并提出许多新颖的观点和先进的界面研究的相关技术手段。

巴恒静等^[11]研究了粉煤灰、硅灰、纳米二氧化硅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。对水泥基沥青混凝土二级显微界面进行了研究,分析了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幅度地提高混凝土的耐久性能;但其研究并未涉及沥青等有机材料对界面的影响。

陈惠苏等^[12-13]介绍了目前国际上存在的几种界面微观结构模型,分析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,描述了界面微观结构的形成及劣化机理,给出了几种常规的和可能成为界面微观结构的表征方法,从原材料的物理、化学组成、配合比(质量比)以及材料制备工艺角度分析了影响界面微观结构的因素;采用正十二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。

2.2 胶浆-集料界面微观结构的研究技术

混凝土界面的研究技术从最早采用光学显微镜观测到水泥砂浆集料与水泥胶浆之间界面的存在开始,随之扫描电镜(SEM)、X衍射(XRD)、压汞法(MIP)以及交流阻抗谱方法以及后来的计算机模拟方法陆续被引用进来。张云升等^[14]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%条件下界面上水化产物生成、发展和演化的过程。Mitsui等^[15]用SEM观察水泥基材料二级界面情况,用能谱仪(EDXA)对样品作元素定性分析,用电子探针(EPMA)进行背散射图像研究。Harutyunyan等^[16]用XRD研究过渡区硅酸盐水化产物的微观结构和晶体结构,并从理论角度分析了集料形状、岩相成分对过渡区结构的影响。Jiunming等^[17]采用超声回弹的方法测定混凝土胶浆-集料界面的粘结性能。Podoll等^[18]首次利用微热量法研究有水存在的条件下胶浆-集料

界面的结构、强度及传输性能,测出胶浆-集料界面平均释放热量,发现界面粘结面积越大,放热量越多。Shinhe等^[19]利用差示扫描量热仪(DSC)、原子力显微镜(AFM)、红外光谱(IR)设备测定沥青-矿粉之间的粘附力,采用滑动薄板流变仪测定集料表面沥青膜的流变性能,给出了沥青-集料界面的结构特征。Choubane等^[20]结合几条沥青路面,利用雷达测试仪中的TERRA程序测出了集料表面沥青膜的厚度。Miknis等^[21]利用核磁共振(NMR)得到沥青与其他有机物粘结界面的微观图像,认为界面形貌的变化取决于沥青的体积分数与试件的成型时间等因素。

钟世云等^[22]采用交流阻抗谱方法对不同砂子体积分数的聚合物改性砂浆的电导率进行测定;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,计算了界面的电导率与水泥浆基体电导率的比值;用交流阻抗方法研究了不同砂子粒径和不同砂子体积分数的聚合物改性砂浆在不同龄期的表现性能。

水中和等^[23]利用SEM、EPMA和EDXA对老混凝土中骨料-水泥界面的微观结构特征和成分分布进行了研究;结果表明:老混凝土由于成熟度高,其界面中水化物十分丰富,密实度高;界面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、Fe等元素富集于界面,而Si元素在此区域的质量分数相对较低。对特定的元素或物质在界面中的富集现象的研究,有助于提高对混凝土材料稳定性的认识。

针对水泥乳化沥青混凝土性能特点,综合应用微观试验分析手段对胶浆-集料界面微观结构进行研究非常重要。

2.3 胶浆-集料界面微观结构的模型

界面微观结构的研究主要是了解界面形貌以及矿物组成与基体的差别,以便提出界面的微观结构模型,并了解界面微观结构的形成机理与影响界面微观结构的因素。在沥青混凝土界面结构特征及结构模型方面,Romanoschi等^[24]、Kjellsen等^[25]建立了结构模型,主要研究了集料与沥青粘结界面的3个参数(界面模量、抗剪强度和摩擦系数)对混合料力学性能的影响,并对耐久性能的影响进行了预测。Podoll等^[26]建立了沥青-集料界面结构模型,并用微热量法测定界面的吸热和放热量。Shah等^[27]研究了影响高性能混凝土界面性能的因素,提出采用

拔出法测定过渡区力学性能,并建立了过渡区的微观结构模型。对于水泥基复合材料界面微观结构的研究已持续了几十年,国际上也出现了几种典型的界面结构模型,但对水泥乳化沥青混凝土结合料的界面微观结构模型研究较少。

2.4 胶浆-集料界面微观结构的影响因素

在混凝土界面结构的影响因素方面,Trende等^[28]研究了集料的粗糙程度对水泥乳化沥青混凝土界面微观结构的影响,认为粗糙的集料表面有利于水泥乳化沥青混凝土界面微观结构的改善。Salter等^[29]研究了集料抗压强度、耐磨性、形状等物理性能对沥青混合料沥青-集料界面结构的影响。Tasong等^[30]运用SEM和X衍射研究了集料质地对界面结构的影响,认为石灰岩在过渡区的化学反应导致了界面内较大孔隙率的产生。Elsharief等^[31]运用SEM研究了水灰质量比、集料尺寸和养护龄期对界面的影响,认为水灰质量比影响界面区域的厚度,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。

3 水泥在界面微观结构中的功能

3.1 促进乳化沥青破乳

乳化沥青破乳过程是一个增水过程,乳化沥青在破乳过程中,沥青微珠裹覆在集料表面形成一层沥青薄膜,而被挤出的水分则处于薄膜之上。如果没有高温、通风等有利于水分挥发的环境,乳液分散在骨料混合物中的水分不能立即排净,这些水分大部分呈游离状态占据着混凝土分散体系的空隙。由于水的粘度低于沥青,因此这些水分在混凝土中甚至起着“润滑剂”的作用,降低骨料之间的内摩擦阻力和胶浆-集料之间的粘附力。水泥的水化反应是一个“需水”过程,可将相当数量的游离水吸附于水泥颗粒的表面,作为水泥水化所需的反应用水;同时,水泥的水化反应又是一个放热过程,从而有利于游离水的挥发。因此,水泥的加入起到了加速乳化沥青破乳、增加胶浆-集料界面粘附力的作用。

3.2 交织构成网状结构

水泥水化反应与乳化沥青破乳形成沥青膜粘附集料同时进行,因而水化物与沥青膜既相互独立又相互渗透地交织在一起。水泥水化产物间的相互连接将沥青与矿粉完全包裹,增强了胶浆的整体稳定性。水化产物在矿粉与沥青薄膜间、沥青薄膜与沥青薄膜间、矿粉与矿粉间起到了“加筋”的作用;最终,水化产物与沥青膜、矿粉相互交织,形成了一种

立体网状结构(图1),并裹覆在集料周围,将集料紧密地结合在一起,使混凝土胶浆-集料界面结构由平面转为立体(图2),界面结构与性能得到改善。

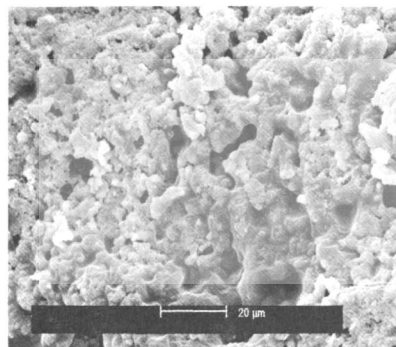


图1 水泥乳化沥青胶浆形貌

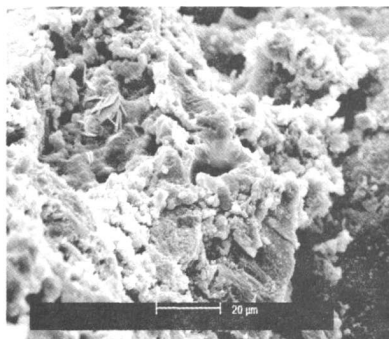


图2 混凝土胶浆-集料界面结构

3.3 弥补胶浆-集料界面缺陷

水泥水化生成氢氧化钙等产物,氢氧化钙与阳离子乳化沥青中的盐酸发生反应生成氯化钙,氯化钙能与水泥中的铝酸三钙反应,生成不溶性复盐氯化铝酸钙;氯化钙还可以与水泥水化产物中的氢氧化钙反应,生成不溶性的氧氯化钙。随着水泥水化反应的不断进行,生成的水化物切断混凝土内部相连微孔,形成均匀、密实、孔隙闭合的整体,使胶浆-集料界面孔隙率降低,增加了混凝土的密实性,提高了混凝土的性能。

3.4 提高沥青-集料界面粘附性

沥青与集料粘附等级试验表明,加入少量水泥后,乳化沥青与集料粘附等级由4级变为5级,沥青-集料粘附性能提高。这是由于集料表面Zeta电位升高,与沥青结合力增强;另外,少部分水泥由于水分不足,或乳化沥青颗粒的包裹作用,不能发生水化反应或未充分水化,在混凝土中起活性矿粉作用,与沥青分子发生化学吸附,形成一层结构力学薄膜,使沥青以结构沥青形式存在,大大提高了沥青与集

料间的粘附性。所以,水泥的水化产物对混凝土胶浆-集料界面粘结起到非常重要的作用。

4 结 语

(1)目前国内外对水泥乳化沥青混凝土研究以宏观性能为主,对其界面结构研究较少,特别是其界面结构内有机-无机材料的存在形式(态)、界面性能与混凝土宏观路用性能的关系较少立项研究;试验手段也需要改进或创新。

(2)国内外对水泥混凝土界面微观结构的研究已持续了几十年,并提出了几种典型的界面结构模型和一些与界面结构相关的理论,找到了研究胶浆-集料界面结构性能的试验手段和方法,探究了原材料性能、养护工艺等因素对胶浆-集料界面结构的影响,但对于水泥乳化沥青混凝土这种有机-无机复合材料的界面微观结构研究较少。

(3)可以借鉴水泥混凝土胶浆-集料界面微观手段,深入研究水泥乳化沥青混凝土胶浆-集料界面微观结构及其影响因素,分析界面微观结构随水泥、矿粉等原材料性能指标、成型工艺等条件变化的规律以及界面微观结构对混凝土宏观性能的影响,分析水泥乳化沥青混凝土原材料组成、界面结构、成型工艺和路用性能之间的定量关系,预测在各种环境条件下混凝土性能发展规律及其路用寿命,开发性能优异的半刚性面层材料,设计相应路面结构,满足中国重载交通的需要。

参考文献:

References:

- [1] Oruc S, Celik F, Akpinar M V. Effect of cement on emulsified asphalt mixtures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16(5): 578-583.
- [2] Huang B S, Shu X. Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(10): 2208-2213.
- [3] 胡力群,沙爱民. 振碾式乳化沥青-水泥混凝土的路用性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(2): 12-15.
HU Li-qun, SHA Ai-min. Road performance of vibration-compaction emulsified-asphalt cement concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 12-15.
- [4] Bayomy F M. Development and analysis of cement-coated aggregates for asphalt mixtures[C]//ASTM. Symposium on Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. Philadelphia: ASTM, 1992: 19-34.
- [5] Aiqadi I L, Gouzu H, Weyers R E. Asphalt Portland cement concrete composite: laboratory evaluation[J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 12(1): 94-108.
- [6] Darwin D. Interfacial transition zone: direct evidence on compressive response[C]// MRS. Proceedings of the 1994 MRS Fall Meeting. Pittsburgh: Materials Research Society, 1995: 419-427.
- [7] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [8] 徐培华, 宋哲玉, 姚爱玲, 等. 灌注式半刚性路面面层复合材料试验研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 7-10.
XU Pei-hua, SONG Zhe-yu, YAO Ai-ling, et al. Test research on pouring semi-rigid road surface's mixture materials[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(4): 7-10.
- [9] Scrivener K L, Crumie A K, Laugesen P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete[J]. Interface Science, 2004, 12(4): 411-421.
- [10] Farran J. The transition zone discovery and development: interfacial transition zone in concrete[R]. London: RILEM, 1996.
- [11] 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.
- [12] 陈惠苏, 孙 伟, Stroeven P. 水泥基复合材料集料与胶浆界面研究综述(二): 界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(1): 70-79.
CHEN Hui-su, SUN Wei, Stroeven P. Interfacial transition zone between aggregate and paste in cementations composites (Part II): mechanism of formation and degradation of interfacial transition zone microstructure and its influence factors [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(1): 70-79.
- [13] 陈惠苏, 孙 伟, Stroeven P. 计算混凝土中平均最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 P. 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.
- [14] 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 geopolymer matrix with ESEM [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2003, 31(8): 806-810.
- [15] Mitsui K, Li Z J, Lange D A, et al. Relationship between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface [J]. *ACI Materials Journal*, 1994, 91(1): 30-39.
- [16] Harutyunyan V S, Abovyan E S, Monteiro P 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.
- [17] Jiunming L, Sansalone M. Impact-echo studies of interfacial bond quality in concrete (Part I): effects of unbounded fraction of area [J]. *ACI Materials Journal*, 1996, 93(3): 223-232.
- [18] Podoll R T, Irwin K C. Flow microcalorimetry studies of the asphalt/aggregate interface [C]//ACS. Symposium on Chemistry and Characterization of Asphalts. Washington D C: ACS, 1990: 346-352.
- [19] Shinhe H, Turner T F, Pauli A T, et al. Evaluation of different techniques for adhesive properties of asphalt-filler systems at interfacial region [C]//ASTM. Symposium on Advances in Adhesives, Adhesion Science, and Testing. Washington D C: ASTM, 2005: 114-128.
- [20] Choubane B, Fernando E, Ross S C, et al. Use of ground penetrating radar for asphalt thickness determination[C]// SPIE. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering. San Diego C A: SPIE, 2003: 230-240.
- [21] Miknis F P, Pauli A T, Michon L C, et al. NMR imaging studies of asphaltene precipitation in asphalts [J]. *Fuel*, 1998, 77(5): 399-405.
- [22] 钟世云, 史美伦, 唐国宝, 等. 聚合物改性水泥砂浆界面的交流阻抗谱研究[J]. *硅酸盐学报*, 2002, 30(2): 144-148.
- ZHONG Shi-yun, SHI Mei-lun, TANG Guo-bao, et al. Study on the alternating current impedance spectroscopy of polymer modified mortars [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2002, 30(2): 144-148.
- [23] 水中和, 万惠文. 老混凝土中骨料-水泥界面过渡区 (ITZ) (I): 元素与化合物在 ITZ 的富集现象 [J]. *武汉理工大学学报*, 2002, 24(4): 21-23.
- SHUI Zhong-he, WAN Hui-wen. Aggregate-cement interfacial transition zone (ITZ) in old concrete (I): concentrations of elements and compounds to the ITZ [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2002, 24(4): 21-23.
- [24] Romanoschi S A, Metcalf J B. Characterization of asphalt concrete layer interfaces [C]//TRB. Transportation Research Record, Washington D C: TRB, 2001: 132-139.
- [25] Kjellsen K O, Wallevik O H, Jallberg L. Microstructure and microchemistry of the paste-aggregate interfacial transition of high performance concrete [J]. *Advance in Cement Research*, 1998, 10(1): 33-41.
- [26] Podoll R T, Becker C H, Irwin K C. Flow microcalorimetry and SALI studies of the asphalt aggregate interface [J]. *Fuel Science & Technology International*, 1992, 10(4/6): 953-977.
- [27] Shah S P, Li Z, Lange D A. Properties of aggregate-cement interface for high performance concrete [C]//ASCE. Proceedings of the 9th Conference on Engineering Mechanics. New York: ASCE, 1992: 852-855.
- [28] 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.
- [29] Salter R J, Eimansy N M. Some effects of aggregate characteristics on asphalt mixtures [J]. *Highways*, 1998, 56: 53-54.
- [30] Tasong W A, Lynsdale C J, Cripps J C. Aggregate-cement paste interface (Part I): influence of aggregate geochemistry [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(7): 1019-1025.
- [31] Elsharief A, Cohen M D, Olek J. 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.