活性瓷釉(CRE)涂层钢筋防腐蚀技术研究进展

闫东明^{①*}, 陈根达^{②*}, 唐福建^②, 吴承霖^②

① 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058;

② 密苏里科技大学土木工程系, 罗拉 65409, 美国

* E-mail: dmyan@zju.edu.cn; gchen@mst.edu

收稿日期: 2014-01-10; 接受日期: 2014-07-31

国家自然科学基金(批准号: 51379186)和美国国家自然科学基金(批准号: CMMI-0900159)资助项目

摘要 活性瓷釉(CRE)涂层是近几年国际上才开始系统研究的一项新型钢筋防腐蚀涂层技术. CRE 涂层能够显著提高钢筋的耐腐蚀能力, 增加钢筋与混凝土之间黏结强度, 提升结构的整体稳定性, 从而改善结构的安全性和耐久性; 该涂层材料成本低廉, 加工工艺简单, 利于大范围使用. 首先对 CRE 涂层技术的特点进行了介绍, 然后对当前 CRE 涂层技术的研究进展进行了综述, 重点介绍了 CRE 涂层对钢筋混凝土黏结力学性能和钢筋耐腐蚀性能的影响, 最后对该技术应用于我国的前景进行了展望.

关键词

混凝土
CRE 涂层
钢筋腐蚀
黏结强度
耐久性

1 引言

钢筋防腐蚀措施研究当前国际土木工程学术界的一个热点^[1~4]. 目前, 我国已经迈入了海洋经济大发展时代^[5]. 可以预见, 未来一个时期将有大批海港口岸、跨海桥梁、隧道、海上采油平台等大型钢筋混凝土结构在我国沿海高腐蚀地区兴建. 利用新材料、新技术解决钢筋腐蚀问题是当前我国土木工程领域科技工作者最迫切的任务之一.

1.1 钢筋混凝土结构耐久性理论及腐蚀防护技术研究

在过去几十年里, 钢筋混凝土结构耐久性理论以及钢筋耐久性提升措施研究一直是国际土木工程学术界的一个热点^[6]. 我国学者在该领域开展了大量工作. 如陈肇元^[7]、施锦杰和孙伟^[8]、张德峰和吕志涛^[9]、刘西拉和苗澍柯^[10]、洪乃丰^[1]、金伟良等人^[12]、

牛荻涛等人^[13]、冷发光等人^[14]、巴恒静等人^[15]、贡金鑫等人^[16]、范颖芳等人^[17]在钢筋混凝土耐久性理论方面开展了大量工作, 为我国土木工程结构耐久性理论奠定了基础; 李伟华等人^[18]、刘志勇等人^[19]、董必钦等人^[20]、杜洪彦等人^[21]、孙红尧等人^[22]、宋玉普和宋立元^[23]、刘铁军等人^[24]等在钢筋混凝土耐久性提升技术方面取得了大量创新性研究成果.

随着钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀和防护机理研究的不断深入, 目前已经发展了多种钢筋混凝土防腐蚀技术^[25,26], 最常用的方法有: (1) 混凝土表面涂覆技术; (2) 钢筋覆膜技术; (3) 阴极保护技术; (4) 阻锈剂技术等. 这些技术为解决钢筋腐蚀问题发挥了积极作用. 其中钢筋覆膜技术对钢筋的保护最为直接, 通常被认为是最经济有效的方法之一^[27]. 钢筋覆膜技术按涂层材料可以分为: (1) 金属材料, 如不锈钢热喷涂涂层钢筋、镀锌钢筋、包铜钢筋等; (2) 有机材料, 如环氧树脂(FBE)涂层钢筋等; (3) 无机材

引用格式: 闫东明, 陈根达, 唐福建, 等. 活性瓷釉(CRE)涂层钢筋防腐蚀技术研究进展. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 293–305

Yan D M, Chen G D, Tang F J, et al. Recent advances in the development and application of chemically reactive enamel coating for steel bars (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 293–305, doi: 10.1360/N092014-00010

料,如磷酸盐涂层钢筋、CRE 涂层钢筋等;(4) 组合涂层,如镀锌与环氧树脂双重涂层钢筋^[28]等。从目前的工程应用情况来看,不锈钢涂层钢筋、镀锌钢筋等技术成本比较高。无机涂层材料中磷酸盐涂层对钢筋抗腐蚀能力和与混凝土黏结力的增强作用都很有有限^[29]。有机涂层材料中 FBE 涂层得到比较广泛地使用。下面着重介绍 FBE 涂层技术和 CRE 涂层技术。

1.2 FBE 涂层技术

FBE 涂层是英文“Fusion-Bonded Epoxy Coating”的缩写,译为“环氧树脂涂层”,起源于美国,1973 年首先用于公路桥梁,随后在钢筋混凝土路面、车库、隧道、废水处理厂以及海上建筑物等得到广泛的应用。完整无破损的 FBE 涂层能够增强钢筋耐腐蚀能力,然而带有局部破损的 FBE 涂层难以有效保护钢筋。美国当时对 FBE 涂层钢筋腐蚀破坏机理认识不足,在佛罗里达、弗吉尼亚、俄勒冈等应用于工程后出现了 FBE 涂层甚至会加速钢筋腐蚀的现象,造成大量经济损失^[28,30,31]。在高腐蚀环境中 FBE 涂层局部破损对钢筋耐腐蚀性影响更为显著。

在力学性能方面,FBE 涂层降低了钢筋与混凝土的黏结强度。环氧树脂是有机涂层材料,平整并且光滑的表面造成钢筋与混凝土之间黏结强度下降。FBE 涂层钢筋与混凝土的黏结强度通常低于普通钢筋^[6,32,33,34]。在钢筋混凝土结构设计时不得不增加环氧涂层钢筋的搭接长度,如我国现行混凝土结构设计规范(GB50010-2010)^[35]规定 FBE 涂层钢筋锚固长度取修正系 1.25,美国 ACI 规范 12.2.4 款规定 FBE 涂层钢筋的锚固长度需乘以 1.2 的系数^[34]。这在一定程度上增加了施工难度,造成资源浪费。

FBE 涂层技术在 1990 年引入我国以后,开始在一些工程中得到应用。在工程实践中,现场钢筋的运输、搬运、绑扎以及混凝土浇筑施工中难以完全防止 FBE 涂层受到破坏。环氧涂层的完整性遭到破坏后,在腐蚀环境中的钢筋会在破损处发生严重的局部腐蚀。所以 FBE 涂层技术除了要求 FBE 涂层材料的质量之外,对运输、装卸、存储过程和混凝土施工质量、人员素质和管理水平都提出了严格要求。这些因素影响了该项技术的发展^[26]。近年来在研究者不断努力下 FBE 涂层技术也取得了一定发展,在我国杭州湾大桥等重要工程中进行了应用^[36]。

1.3 CRE 涂层技术

CRE 涂层是英文“Chemically Reactive Enamel Coating”的缩写,译为“活性瓷釉涂层”,起源于美国。从 2007 年开始,美国密苏里科技大学陈根达(Genda Chen)教授带领研究团队在国际上率先对这种新型钢筋防腐蚀涂层技术开展系统的研究工作。该技术得到了美国自然科学基金委员会、美国联邦政府交通部、美国密苏里州政府交通部、美国陆军实验室等机构的广泛认可,获得多项研究课题和经费资助。研究团队从多个角度对这种钢筋 CRE 涂层技术进行广泛研究:对材料的化学组分进行了优化;根据土木、水利、交通工程中钢筋混凝土结构的特点对 CRE 涂层钢筋的抗腐蚀性能进行深入探索;对涂层钢筋与混凝土的黏结性能进行了研究。通过这些研究,涂层工艺和施工方法已经趋于成熟,向工程应用领域转化的时机即将到来。国内浙江大学闫东明博士从 2011 年开始研究并推广 CRE 涂层技术^[37-40],引起了国内学者以及工程界的兴趣。目前,闫东明利用国内的玻璃粉等材料对 CRE 涂层性能进行优化,对 CRE 涂层钢筋混凝土构件力学性能与耐久性、CRE 涂层钢筋混凝土结构设计方法等方面进行研究。

CRE 涂层具有如下特点:(1) 突出的抗腐蚀能力。CRE 涂层能够大幅度提升钢筋耐腐蚀能力,是普通钢筋耐腐蚀能力 4.6 倍以上^[41]。(2) 与混凝土黏结能力突出。对圆钢的试验数据显示:CRE 涂层能够显著增强钢筋与混凝土之间的黏结强度,是普通钢筋与混凝土黏结强度 7 倍以上^[42]。(3) 材料自身耐久性强。CRE 涂层是无机材料,自身具有非常强的耐久性,不会随时间发生显著的性能劣化,可以长久、有效地发挥作用。(4) 成本低廉,工艺简单。CRE 涂层的主要原材料是玻璃粉和活性硅酸钙,是市场上普通的工业产品,成本很低。通过熔化后覆在钢筋表面,制作工艺简单,利于大范围工程应用。CRE 涂层技术是钢筋防腐蚀措施研究领域一个有广阔应用前景的发展方向。

2 CRE 涂层技术研究进展

2.1 CRE 涂层材料

CRE 涂层技术以玻璃粉和活性硅酸钙(CS)为主要原料并掺入微量其他化学成份,高温熔化后覆在钢筋表面,在钢筋表面形成一层致密的保护层,从而

达到增强钢筋抗腐蚀能力和与混凝土黏结力的目的. 典型的 CRE 涂层钢筋见图 1 所示.

CRE 涂层材料中的主要化学成分是硅、钙的氧化物, 主要化学元素为硅(Si), 钙(Ca)和氧(O)等(图 2), 同时还有少量元素如铝(Al), 钠(Na), 镁(Mg), 钾(K)以及钴(Co)等. Chen 研究组^[43,44]以增强 CRE 涂层与混凝土黏结力、提高 CRE 涂层韧性为目标, 借助化学分析、耐腐蚀试验和力学试验方法^[41,43]对 CRE 涂层的原料配方以及加工工艺进行优化. 通过优化, CRE 涂层与钢筋的结合力非常牢固, 在 500 多组钢筋混凝土的力学试验中没有发现 CRE 涂层与钢筋脱离

的现象, CRE 涂层与钢筋的黏结力很强; CRE 涂层韧性得到很大提高, 其抗碰撞能力远超过普通瓷釉. 研究数据表明: CRE 涂层钢筋的拉伸应变达到 2000 时, 涂层内仍然未出现可见裂缝; 同时, CRE 涂层与混凝土黏结力也非常突出.

2.2 CRE 涂层对钢筋混凝土结构力学性能的影响

2.2.1 CRE 涂层对圆钢-混凝土黏结性能的影响

CRE 涂层与钢筋之间结合非常牢固, 黏结力很强, 一般不会发生破坏. CRE 涂层能与混凝土基体产生一系列化学反应并生成一种密度较高的硅酸盐, 在钢筋与混凝土基体之间形成一层特殊的界面层. 该界面层具有高密度、高强度的特征, 从而 CRE 涂层钢筋与混凝土之间具有很高的黏结强度. 同时, CRE 涂层改变了钢筋表面的粗糙度, CRE 涂层与混凝土产生化学反应而生成化学键, 增强黏结力; CRE 涂层还能改变与之相邻的混凝土微观结构, 从而能够改善钢筋与混凝土之间的黏结性能. 对圆钢进行拔出试验, 试验装置如图 3 所示. 试件采用直径为 57.2, 长 38.1 mm 的混凝土圆柱, 中间嵌入直径为 6.35 mm 的圆形钢筋. 从所完成的试验中发现: CRE 涂层钢筋的 28, 60 和 97 d 黏结强度比普通钢筋的 7 倍以上, 如图 4 所示^[42]. 委托美国陆军工程师研究与发展中心的试验也得出了类似结论^[46,47]. 黏结强度的提高可以减少混凝土中钢筋的搭接长度, 提高结构刚度, 降低施工难度, 节省资源.

普通钢筋或者环氧涂层钢筋与混凝土交界面的形成过程中, 水泥固化过程形成的多孔过渡层随养护时间继续得到发展, 造成钢筋和水泥之间黏结强度随着时间发生降低的现象^[48]. 本文的试验中发现普通钢筋的黏结强度从 7 到 28 d 没有明显增加, 而 CRE 涂层钢筋的黏结强度随着龄期的增加在增长(图 4(a)). 从破坏模式上看, 对于圆形光面钢筋, 钢筋与混凝土之间的黏结力比较弱, 破坏时表现为钢筋直接从混凝土中拔出, 而混凝土内没有发生明显破坏. 对于 CRE 涂层钢筋, 由于黏结力较大, 在钢筋拔出过程中混凝土首先开裂, 最大荷载值远远大于“钢筋直接拔出型”破坏的荷载值. 因此, CRE 涂层材料能够增强钢筋与混凝土的黏结力, 有效地利用了混凝土材料的受载能力, 从而充分发挥了土木工程结构材料的潜力.

图 1 CRE 涂层钢筋

(a) CRE 涂层钢筋(圆钢); (b) 涂层局部放大

图 2 能谱图

图3 钢筋拔出性能研究
(a) 试件; (b) 试验装置

图4 钢筋拔出性能试验结果
(a) 黏结强度; (b) 破坏模式

2.2.2 CRE 涂层材料对板抗弯性能的影响

板抗弯性能试验中采用的试件和试验装置如图 5(a)所示. 在试验过程中布置 8 个位移计对加载过程中的变形量进行连续记录, 同时观测板受力过程中裂缝发展情况. 典型的板破坏模式见图 5(b). 荷载-变形曲线如图 6 所示. 从承载力来看, 掺有 1%CRE 涂层钢纤维的混凝土板的极限承载力为 69.9 kN, 而相同掺量普通钢纤维混凝土板的极限承载力为 60.1 kN. 这表明, CRE 涂层能够在一定程度上提高钢纤维与混凝土黏结力, 从而增强钢纤维混凝土结构的力学性能. 从测得的荷载-变形曲线上(图 6)发现相对于普通钢纤维混凝土板, CRE 涂层钢纤维混凝土板变形

能力更强, 具有更好的延性.

2.2.3 CRE 涂层对梁抗弯性能的影响

研究了 CRE 涂层对钢筋混凝土梁力学性能的影响. 试件尺寸为 3352 mm×457 mm×305 mm 的钢筋混凝土梁, 采用四点弯曲加载, 加载装置如图 7 所示^[50]. 加载方式采用静态均匀加载至破坏, 记录加载过程中跨中挠度、钢筋应变以及荷载随时间的变化, 同时记录裂缝发展过程. 试验结束时, 观察钢筋与混凝土之间的黏结破坏形态以及钢筋的屈服情况. 典型的荷载变形曲线如图 8 所示. 研究发现 CRE 涂层能够增强混凝土与拼接钢筋之间黏结强度 44%. CRE 涂层能够增强梁的极限承载力, 但是对初始刚度的影响

图 5 静力荷载下板抗弯试验

(a) 实验装置; (b) 破坏形态

图 6 混凝土板荷载-变形曲线

(a) 无涂层钢筋; (b) 有涂层钢筋

图 7 钢筋混凝土梁试验装置

不大. 与普通钢筋混凝土梁相比, 在受载后 CRE 涂层钢筋混凝土梁受拉区出现了更多的细微裂纹, 说明 CRE 涂层增强了钢筋与周围混凝土的黏结力, 从而改善了梁的整体受力状态和破坏模式.

2.2.4 CRE 涂层对钢筋混凝土板抗爆炸冲击性能的影响

利用加载装置对 30 组尺寸为 1200 mm×1200 mm×90 mm 的混凝土板进行抗爆炸冲击试验, 研究了 CRE 涂层钢筋混凝土板的变形特征和破坏模式(图 9). 研究发现: 相对于普通钢筋混凝土板, CRE 涂层

图 8 钢筋混凝土梁荷载-变形曲线

图 9 板爆炸冲击试验

(a) 试验装置; (b) 不同爆炸作用下的破坏模式

钢筋混凝土板破坏时裂纹数量增多、裂缝间距变小、最大裂纹宽度减小 30%~50%。这一现象表明钢筋混凝土板的整体性能得到很大提升,这对于提高结构的承载能力、充分发挥结构破坏时材料的能力具有重要意义。同时,裂纹宽度减小能够减少或延缓腐蚀物质的侵入,有利于提高钢筋混凝土结构耐久性。

2.2.5 CRE 涂层对防护墙抗爆性能的影响

在美国军方协助下对等尺寸(原型)防护墙进行了抗爆试验,研究爆炸荷载作用下 CRE 涂层对钢筋

混凝土结构抗爆性能的影响。美国在伊拉克战争中曾大量使用防护墙以保护重要建筑物和设施免受汽车炸弹的袭击。将 CRE 涂层应用于防护墙内的钢筋表面,有可能在发生爆炸时钢筋与混凝土能够牢固地黏结,减少混凝土碎片飞出对人员的伤害,增强防护墙的抗爆能力。试验中通过调整炸药的用量以及到试件的距离,调整爆炸荷载的大小。等尺寸钢筋混凝土防护墙爆炸试验现场如图 10(a)所示。在试件内部预置了应变传感器,位置如图 10(b)所示。

爆炸结束后防护墙的破坏模式见图 10(c)和(d)。

图 10 爆炸荷载作用下防护墙抗爆试验

(a) 试验现场; (b) 试件尺寸及传感器位置; (c) 经过 10 lb 炸药后的裂缝分布; (d) 经过 45 lb TNT 炸药后的破坏模式

爆炸荷载作用下两种防护墙的破坏模式有明显区别: 相对于普通钢筋混凝土防护墙, CRE 涂层钢筋混凝土防护墙的裂缝数量有减少趋势; 爆炸结束以后, CRE 涂层钢筋防护墙的表面裂缝宽度更小; 这是因为 CRE 涂层钢筋与混凝土之间的黏结力很强, 受到爆炸荷载后与混凝土仍然有比较强的黏结力, 从而使得爆炸结束后钢筋有一定程度上的弹性恢复, 从而裂纹也有一定程度上闭合。从图 10(d)可以看出, 在 45 lb TNT 炸药爆炸后, 相对于 CRE 涂层钢筋防护墙, 普通钢筋防护墙的破坏更为严重, 纵向钢筋完全被拔出, 基座破坏严重。该现象进一步证明动力荷载作用下 CRE 涂层对钢筋-混凝土黏结力具有明显的增强作用。

2.3 CRE 涂层钢筋的耐腐蚀性能研究

在过去的几年中, Chen 研究团队^[41,43]采用电化学阻抗谱分析方法(EIS), 开放电位方法(OCP)^[45], 线性极化法(LPR)^[45], 动点位极化测试(PPT)^[44]等多种方法研究了 CRE 涂层钢筋在腐蚀环境下的锈蚀规律。

2.3.1 CRE 涂层耐腐蚀机理

钢筋在使用过程中会受到腐蚀物质的侵蚀。钢筋涂层技术的关键是将侵蚀物质与钢筋进行隔离。能否长久地将腐蚀性物质与钢筋隔离开, 是衡量钢筋涂层技术的重要指标。对于完整、无损伤的钢筋防腐涂层, 其耐腐蚀性能取决于涂层材料自身的性质。FBE 涂层材料内部致密空隙小, 能够有效阻止水分的进入。然而作为有机材料, FBE 涂层材料自身的耐久性存在不足。在腐蚀性物质侵蚀、紫外线照射、干湿循环以及温度变化等作用下, 环氧树脂材料的性能会逐渐发生劣化, 有的甚至完全丧失对钢筋的保护作用。对于 CRE 涂层钢筋, 涂层具有很好的防水性, 能够有效防止腐蚀性物质的侵入, 从而保护钢筋。更重要的是作为无机材料, CRE 涂层不会随时间发生明显的性能劣化, 从而能够长久地保护钢筋免受腐蚀物质的侵蚀, 增强钢筋的全寿命耐腐蚀能力。

完整、无缺陷的钢筋涂层能够有效地阻止水分侵入, 降低腐蚀风险。然而在钢筋运输、装卸、加工和施工(如混凝土振捣)过程中, 钢筋容易受到碰撞、弯

曲、拉伸等作用,引起钢筋涂层内发生局部损伤或破坏.这在工程应用中难以完全避免.对于FBE涂层钢筋来讲,一旦涂层发生损伤,侵蚀性物质会随着水逐渐进入到钢筋与混凝土的结合面,并在此破损处沿结合面向周围发展,从而引起钢筋表面的腐蚀面积逐步扩大,引起严重的钢筋性能退化,如图11所示.与FBE涂层相比,带局部破损CRE涂层钢筋锈蚀仅仅局限在损伤区域,不会沿钢筋与涂层的结合面向周围扩展(图12),腐蚀的深度也在非常有限的范围,从而大大降低了钢筋的腐蚀风险(图13)^[41].除此之外,CRE涂层具有自修复能力,当涂层有局部损伤时,损伤区周围涂层内的活性物质会沿着钢筋表面向着损伤区“生长”,如果损伤区较小,将会在短时间内重新覆盖损伤区,新生成的覆盖层同样具有阻止腐蚀

发展的能力,从而有效保护钢筋免受进一步的腐蚀作用.大量测试数据证实了这一特性^[41].与当前广泛应用的FBE涂层相比,CRE涂层具有显著优势.

2.3.2 CRE涂层钢筋腐蚀试验

采用加速腐蚀试验研究了CRE涂层钢筋的耐腐蚀性能.试验中将钢筋浸泡在NaCl溶液并外加电流进行加速腐蚀,不同涂层的12根钢筋均匀分布在碳棒周围,试验装置如图14(a)所示,试件处于完全相同的环境条件.监测通过钢筋的腐蚀电流来了解锈蚀状态.测得的耐腐蚀性能如图14(b)所示,估算得出CRE涂层钢筋耐腐蚀时间是普通钢筋4.6倍以上^[41].

通过电化学测试研究了CRE涂层对钢筋耐腐蚀性能的影响.采用的试件如图15(a)所示,测得不同

图11 FBE涂层钢筋点状腐蚀横截面图

(a) FBE涂层钢筋局部损伤区; (b) 损伤区局部放大图

图12 CRE涂层钢筋点状腐蚀横截面图

图13 腐蚀破坏机理示意图

图 14 钢筋加速锈蚀试验

(a) 试验装置; (b) 耐腐蚀时间

钢筋涂层状态的电荷转移电阻见图 15(b). 相对于普通钢筋, CRE 涂层钢筋的耐腐蚀性能有非常显著的提高. 三种不同 CRE 涂层工艺对钢筋耐腐蚀性能的影响也有所不同, 如图 15(b)所示^[43-45]. 一种是采用 100%瓷釉(PE), 第二种是 50%瓷釉和 50%活性 CS 混合物(ME), 第三种双层: 即先涂一层 100%瓷釉, 再涂一层 50%瓷釉和 50%活性 CS 混合物(DE). 将三种 CRE 涂层方法对钢筋耐腐蚀性能的影响进行对比发现, 双层 CRE 涂层(DE)技术对钢筋耐腐蚀性能的增强作用最为显著.

2.3.3 有局部损伤区的 CRE 涂层钢筋耐腐蚀性能

为了模拟真实工程中钢筋涂层存在局部破损的状况, 对不同涂层钢筋预设一定程度的损伤. 设计的试验装置如图 16(a)所示, 通过调整落锤的高度, 模

拟涂层受到不同撞击时涂层的损伤程度^[43,45,51]. 对有局部破损 CRE 涂层钢筋耐腐蚀能力的试验结果如图 16(c)和(d)所示. 可见相对于完好 CRE 涂层钢筋, 有局部损伤的钢筋耐腐蚀性能有所降低. 然而 6 个损伤点(EP01)涂层钢筋和 12 个损伤点(EP02)涂层钢筋两组相比没有明显的差异, 说明钢筋耐腐蚀性能对 CRE 涂层局部损伤区的数量不敏感.

2.3.4 砂浆内 CRE 涂层钢筋的耐腐蚀性能

混凝土内 CRE 涂层钢筋的耐腐蚀性能是将 CRE 涂层技术应用于土木工程的关键. 然而这方面的研究相对薄弱. Chen 研究组^[49]采用如图 17(a)所示的试件研究了砂浆内 CRE 涂层钢筋的耐腐蚀性能. 将不同涂层状况的钢筋两端用环氧树脂密封, 固定在试件中央, 在外围浇筑圆柱形砂浆. 通过外加电流方式

图 15 电化学试验

(a) 试件尺寸(mm); (b) 电荷转移电阻

图 16 EIS 试验

(a) 试验装置; (b) 不同涂层的破坏形态; (c) 模量(modulus); (d) 相位角(phase angle)

进行加速腐蚀, 研究混凝土内 CRE 涂层钢筋的耐腐蚀性能. 不同涂层钢筋与混凝土黏结层的细观结构见图 17(b), 可见不同涂层钢筋与混凝土的结合面具有很大的差异, 普通钢筋与混凝土的交界面空隙多, 是薄弱区; 而 CRE 涂层(DE)钢筋的交界面更加密实. 试验测得的腐蚀电流密度见图 17(c), 可见与普通钢筋相比, CRE 涂层显著改善了钢筋的耐腐蚀性能; 而三种 CRE 涂层方式相比, PE 和 DE 两种对钢筋耐腐蚀性能的提升效果更为显著.

钢筋混凝土结构通常允许带裂缝工作. 在实际工程应用中, 由于荷载作用、温度变化、冻融循环等影响, 钢筋混凝土结构通常都带有不同尺寸的裂缝. 在裂缝存在情况下, CRE 涂层钢筋是否仍然能够保护钢筋免受腐蚀作用, 是 CRE 涂层技术在土木工程中应用的重要问题. 混凝土宏观裂缝存在时, 处在相应位置的 CRE 涂层内部也有可能开裂, 氯离子将通过裂缝直接进入到钢筋表面(图 17(d)); 在碱性环境中, 涂层开裂区的钢筋表面可能发生非常复杂的化学反应和物理

变化, 有可能对钢筋混凝土结构的宏观力学性能和耐久性产生重要影响. 相关研究内容正在进行之中.

3 结论与展望

对于我国沿海地区以及西部盐碱地区等处于极端腐蚀环境下的土木工程结构, 防腐蚀措施是影响结构使用寿命最关键的因素之一. CRE 涂层能够有效地增强钢筋混凝土的抗腐蚀能力, 提升钢筋混凝土结构的使用寿命. 除此之外, CRE 涂层材料与混凝土之间还具有很高的黏结强度, 能够降低钢筋与混凝土之间的滑移量, 减小结构受到荷载时的变形量, 从而有效地提升钢筋混凝土结构的整体稳定性. 与此同时, CRE 涂层材料成本低廉, 施工工艺简单, 利于在工程中大范围使用. 将 CRE 涂层技术应用于我国土木工程建设中, 有可能大幅度提升我国的土木工程的安全性, 延长结构使用寿命, 为我国的土木工程建设做出重大贡献.

图 17 混凝土内 CRE 涂层钢筋的耐腐蚀性能

(a) 试验装置; (b) 扫描电子显微镜(SEM)图像; (c) 试验装置; (d) 混凝土开裂对 CRE 涂层的影响示意图

参考文献

- 1 洪乃丰. 钢筋混凝土技术设施的腐蚀与全寿命经济分析. 建筑技术, 2002, 33: 254-257
- 2 Li C Q, Melchers R E. Time-dependent risk assessment of structural deterioration caused by reinforcement corrosion. ACI Struct J, 2006, 102: 754-762
- 3 金贤玉, 顾祥林, 田野, 等. 混凝土结构服役寿命设计的探索与研究进展. 中国材料进展, 2009, 28: 26-35
- 4 金伟良, 牛荻涛. 工程结构耐久性与全寿命设计理论. 工程力学, 2011, 28(增刊 II): 31-37
- 5 王敏旋. 我国发展海洋经济上升到国家战略的几点思考. 当代经济, 2012, 2: 66-67
- 6 Bertolini L, Elsener B, Pedersen P, et al. Corrosion of steel in concrete. UK: Wiley-VCH, 2004
- 7 陈肇元. 混凝土结构的耐久性设计方法. 建筑技术, 2003, 34: 328-335
- 8 施锦杰, 孙伟. 电迁移加速氯盐传输作用下混凝土中钢筋锈蚀. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41: 1042-47
- 9 张德峰, 吕志涛. 裂缝对预应力混凝土结构耐久性的影响. 工业建筑, 2000, 30: 12-14
- 10 刘西拉, 苗澍柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算. 土木工程学报, 1990, 23: 69-78
- 11 冯乃谦, 邢峰. 混凝土与混凝土结构的耐久性. 北京: 机械工业出版社, 2009
- 12 金伟良, 袁迎曦, 卫军, 等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法. 北京: 科学出版社, 2011
- 13 牛荻涛, 王庆霖, 王林科. 锈蚀开裂前混凝土中钢筋锈蚀量的预测模型. 工业建筑, 1996, 26: 8-10
- 14 冷发光, 冯乃谦, 邢峰. 混凝土应力腐蚀研究现状及问题. 混凝土, 2000, 130: 6-9
- 15 巴恒静, 张武满, 邓宏卫. 评价高性能混凝土耐久性综合指标——抗氯离子渗透性及其研究现状. 混凝土, 2006, 197: 3-4
- 16 贡金鑫, 王海超, 李金波. 腐蚀环境中荷载作用对钢筋混凝土梁腐蚀的影响. 东南大学学报, 2005, 35: 421-426
- 17 范颖芳, 周晶, 黄振国. 受氯化物腐蚀钢筋混凝土构件承载力研究. 工业建筑, 2001, 31: 3-5

- 18 李伟华, 田惠文, 侯保荣. 钢筋混凝土结构的腐蚀与涂层防护. 现代涂料与涂装, 2008, 11: 31-34
- 19 刘志勇, 缪昌文, 周伟玲, 等. 迁移性阻锈剂对混凝土结构耐久性的保持和提升作用. 硅酸盐学报, 2008, 36: 1494-1500
- 20 董必钦, 罗帅, 邢峰. 多因素作用对混凝土硫酸盐腐蚀的影响作用. 混凝土, 2007, 215: 33-36
- 21 杜洪彦, 邱富荣, 林昌健. 混凝土的腐蚀机理及新型防护方法. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13: 156-161
- 22 孙红尧, 黄祯煌, 曾瑞玉. 混凝土钢筋表面环氧粉末涂料及其性能的研究. 材料保护, 1997, 30: 7-10
- 23 宋玉普, 宋立元. 海洋钢筋混凝土结构腐蚀影响因素及其提高耐久性措施. 见: 第十四届中国海洋(岸)工程学术会议论文集. 呼和浩特, 2009
- 24 刘铁军, 李家和, 欧进萍. 高阻尼混凝土的耐久性试验与综合评定. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38: 715-719
- 25 赵铁军. 渗透型涂料表面处理与混凝土耐久性. 北京: 科学出版社, 2009
- 26 耿春雷, 徐永模, 翁端. 混凝土中钢筋保护技术研究进展. 材料导报: 综述篇, 2009, 23: 20-24
- 27 Selvaraj R, Selvaraj M, Iyer S V K. Studies on the evaluation of the performance of organic coatings used for the prevention of corrosion of steel rebar in concrete structures. Prog Org Coat, 2009, 64: 454-459
- 28 Dong S, Zhao B, Lin C, et al. Corrosion behavior of epoxy/zinc duplex coated rebar embedded in concrete. Constr Build Mater, 2012, 28: 72-78
- 29 Jalili M M, Moradian S, Hosseinpour D. The use of inorganic conversion coatings to enhance the corrosion resistance of reinforcement and the bond strength at the rebar/concrete. Constr Build Mater, 2009, 23: 233-238
- 30 Sagues A. Corrosion of epoxy coated rebar in Florida bridges. Final Report WPI No 0510603, Florida Department of Transportation. 1994
- 31 Brown M C, Weyers R E. Corrosion protection service life of epoxy coated reinforcing steel in Virginia bridge decks. Final Contract Report, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville. 2003
- 32 El-Hawary M M. Evaluation of bond strength of epoxy-coated bars in concrete exposed to marine environment. Constr Build Mater, 1999, 13: 357-362
- 33 聂永明, 陶学康. 环氧涂层钢筋搭接长度及梁受弯性能试验研究. 建筑科学, 2000, 16: 21-25
- 34 ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary. 2005
- 35 中华人民共和国国家标准(2011), 混凝土结构设计规范, GB50010-2011
- 36 张晏清. 钢筋表面防腐蚀涂层的性能. 建筑材料学报, 2005, 8: 577-579
- 37 闫东明. 活性瓷釉涂层钢纤维混凝土板动、静力学特性研究. 华北水利水电学院学报, 2013, 34: 70-73
- 38 闫东明. 活性瓷釉涂层钢纤维混凝土板动、静力学特性研究. 见: 第十四届全国纤维混凝土学术会议论文集. 郑州, 2012
- 39 闫东明. 活性瓷釉涂层钢筋在混凝土结构抗爆中的应用研究. 见: 全国第十二届混凝土结构基本理论及工程应用学术会议论文集. 宁波, 2012
- 40 闫东明. 活性瓷釉涂层钢筋在混凝土结构抗爆中的应用研究. 见: 中国土木工程学会防护工程分会第十三次学术年会论文集. 宁波, 2012
- 41 Chen G, Voltz J, Brow R, et al. Coated steel rebar for enhanced concrete-steel bond strength and corrosion resistance. Missouri Department of Transportation, Final Report. 2010
- 42 Yan D, Reis S, Tao X, et al. Enamel coating effects on steel-mortar bond strength. Constr Build Mater, 2012, 28: 512-518
- 43 Tang F, Chen G, Volz J S, et al. Corrosion behavior of enamel coated steel rebar by EIS. Adv Mater Res, 2012, 450-451: 445-453
- 44 Tang F, Chen G, Volz J S, et al. Cement-modified enamel coating for enhanced corrosion resistance of steel reinforcing bars. Cement Concrete Comp, 2013, 35: 171-180
- 45 Tang F, Chen G, Brow R K, et al. Corrosion resistance of steel rebar coated with three types of enamel. Corros Sci, 2012, 59: 445-453
- 46 Day D C, Weiss C A, Malone P, et al. Innovative method of bonding Portland cement concrete to steel using a porcelain interface. In: Materials Science and Technology (MS&T) Conference Proceedings. Westerville, OH, 2006
- 47 Hackler C, Koenigstein M, Malone P. The use of porcelain enamel coatings on reinforcing steel to enhance the bond to concrete and steel surfaces. In: Materials Science and Technology Conference Proceedings. Westerville, OH, 2006
- 48 Fu X, Chung D D L. Decrease of the bond strength between steel rebar and concrete with increasing curing age. Cement Concrete Res, 1998, 28: 167-169
- 49 Tang F, Chen G, Brow R K, et al. Microstructure and corrosion resistance of enamel coatings applied to smooth reinforcing steel. Constr Build Mater, 2012, 35: 376-384
- 50 Wu C, Chen G, Volz J S, et al. Global bond behavior of enamel-coated rebar in concrete beams with spliced reinforcement. Constr Build Mater, 2013, 40: 793-801
- 51 Werner C R, Volz J S, Chen G, et al. Corrosion performance of reactive-enamel coated reinforcing steel. ACI Mater J, 2012, 109: 441-450

Recent advances in the development and application of chemically reactive enamel coating for steel bars

YAN DongMing¹, CHEN GenDa², TANG FuJian² & WU ChengLin²

¹ Department of Civil Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

² Department of Civil, Architectural, and Environmental Engineering, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO 65409, USA

A new type of chemically reactive enamel (CRE) coating has recently been developed to improve the corrosion resistance of steel bars and the bond strength between the steel bars and concrete. The corrosion process of steel bars with damaged CRE coating is confined locally around the damage locations, which completely differs from the widespread corrosion process of fusion-bonded epoxy (FBE) coated steel bars. The increase in steel-concrete bond strength with CRE-coated bars can improve the system performance and integrity of reinforced concrete (RC) structures, which also differs from the reduced bond strength with FBE-coated bars. Overall, CRE coating can potentially improve the durability, serviceability, and safety of RC structures under environmental, operational, and extreme loading. Furthermore, CRE coating is simple in manufacture and comparable in cost to widely-used FBE coating. Therefore, CRE coating is a viable alternative to FBE coating for extensive applications in civil engineering. This paper introduces the characteristics of CRE coating, reviews its state-of-the-art development, and prospects its potential applications in China.

concrete, CRE coating, rebar corrosion, bond strength, durability

doi: 10.1360/N092014-00010