

工业 CT 在混凝土钢筋腐蚀检测中的应用

唐盛明¹, 齐子诚^{1,2}, 郑颖¹, 郭智敏¹, 付康¹

(1. 中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103; 2. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310014)

摘要: 钢筋混凝土是世界上使用最广泛的建筑材料之一, 钢筋混凝土建筑所处的外部环境容易造成其内部钢筋的腐蚀, 而最终影响整体构件使用寿命。通过制作钢筋混凝土预制构件试样, 采用模拟加速内部钢筋腐蚀过程, 对其进行三维工业 CT 检测并分析混凝土中钢筋的腐蚀程度, 并测量腐蚀层厚度, 最后通过解剖、金相分析来验证工业 CT 测量结果。结果表明: 采用工业三维 CT 检测技术能够实现对混凝土中钢筋腐蚀情况的无损检测及精确测量。

关键词: 钢筋混凝土; 标样制定; 工业 CT; 尺寸测量

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2017)12-0010-05

Application of Industrial CT in Corrosion Detection of Concrete Reinforcement

TANG Shengming¹, QI Zicheng^{1,2}, ZHENG Ying¹, GUO Zhimin¹, FU Kang¹

(1. The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Reinforced concrete is the most widely used building materials in the world. Changes in the external environment shall cause changes in internal steel corrosion and ultimately affect the overall component life. In this paper, the corrosion process of reinforced concrete is made by simulating and accelerating the internal steel corrosion process. The corrosion degree of the steel in concrete is measured and analyzed by three-dimensional industrial CT. The thickness of the corrosion layer is measured and the results of industrial CT are verified by anatomy and metallographic analysis. The results show that the industrial three-dimensional CT detection technology can realize the non-destructive testing and accurate measurement of the corrosion of steel bars in concrete.

Key words: reinforced concrete; standard sample development; industrial CT; size measurement

钢筋混凝土构件具有原材料来源广泛易得, 强度高、体积稳定性好、易于施工现场造型、成本较低等优点, 是世界上使用最广泛的建筑材料之一^[1]。钢筋混凝土构件一般长期曝露于多变的自然环境中, 外部环境对构件的影响较大, 如腐蚀介质的影响, 往往使这些结构的使用寿命没有预期得那样长。影响钢筋混凝土构件失效的因素众多, 主要包括混

凝土保护层的厚度和质量、环境介质腐蚀性、环境温湿度、钢筋锈蚀等。许多设计规范都有针对性地建立了基于环境分类的保护层厚度、水灰比等与混凝土质量有关的定性耐久性设计方法^[2], 然而对于钢筋混凝土中钢筋腐蚀及腐蚀尺寸测量的研究却较少。

常用的混凝土中钢筋锈蚀的检测方法分为物理、电化学方法两大类^[3]。物理方法的优点是操作方便, 易于现场的原位测试, 受环境的影响较小。物理方法的缺点是测定钢筋锈蚀状况时容易受到混凝土中其他损伤因素的干扰; 对钢筋的锈蚀程度一般只能提供定性的结论, 而难以提供定量的分析。电化学检测方法的主要缺点是容易受到天气条件干扰, 测得的指标单一, 只能单点测量。要做到精确测量混凝土中钢筋的腐蚀尺寸, 以往常采用解剖试样观察混

收稿日期: 2017-06-08

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LQ15E010003); 宁波市自然科学基金资助项目(2016A610247); 宁波国际科技合作资助项目(2015D10005)

作者简介: 唐盛明(1982—), 男, 助理研究员, 主要从事无损检测技术及应用研究

通信作者: 唐盛明, 121702093@qq.com

凝土中钢筋腐蚀的形貌状态的破损方法,其会对试样造成破坏性损伤,无法对试样进行长期观察。

笔者采用工业CT对混凝土中钢筋进行无损检测,对钢筋的锈蚀情况进行有效识别,解决了锈蚀层厚度的整体测量问题,满足了科研生产的要求。

1 工业CT检测工作原理

工业CT(Industrial Computed Tomography, ICT)即工业计算机层析成像技术,其基本原理是:由射线源(X射线或 γ 射线)发出一束扇形射线束穿透被检测工件,由于射线在经过物体时会发生射线能量衰减,衰减的强度与物体的材料密度、尺寸及入射前的能量有关,利用探测器接收穿透物体后的射线并进行模数转换,输入计算机中,采用卷积反投影法对物体截面进行图像重建,最终获得一幅反映被测工件质量信息的截面图像^[4]。三维锥束CT系统与常规CT系统的最大区别在于,三维锥束CT系统采用面阵探测器接收X射线,因而一次扫描即可获取被测物体多个截面的投影数据。图1是一个典型的三维工业CT系统的构成示意。系统在扫描过程中工作台做旋转运动,平板探测器在图像采集控制系统的控制下,将投影扫描数据存储到介质中;扫描结束后,采用专门开发的图像处理和重建系统对投影数据进行一系列处理计算,重建出三维图像^[5]。

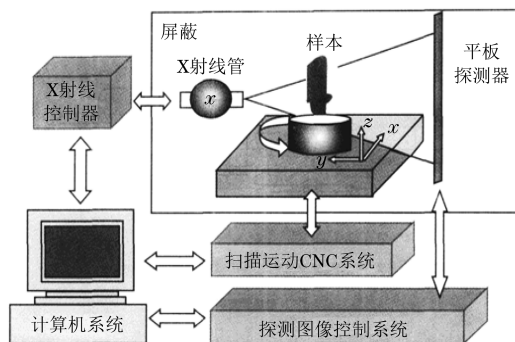


图1 三维工业CT系统构成示意

2 混凝土中钢筋腐蚀规律

一般自然环境下,混凝土中钢筋的腐蚀过程发展非常缓慢。原因在于混凝土由高碱性材料制成,其溶液呈很强的碱性,对钢筋有良好的保护作用。钢筋所处溶液的pH常常超过13,使钢筋表面生成难溶的 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ,又称为钝化膜。研究表明^[6]:当pH降低到11.5时,钝化膜便开始不稳定;当pH达到9.8时,钝化膜很难存在或者完好的钝化膜会遭到破坏。

钢筋混凝土构件中使钢筋脱钝开始腐蚀时的氯离子浓度称为临界氯离子浓度。实验室研究混凝土中钢筋腐蚀现象时,一般需要通过加速腐蚀的方法来缩短试验时间,常采用的方法有通过电迁移氯盐来加速钢筋腐蚀,以及对钢筋直接施加阳极电流或内掺氯盐的方法^[7]。笔者采用电迁移锈蚀法来加速混凝土中钢筋的腐蚀。电迁移锈蚀法是徐港等^[8]近年来提出的一种实验室加速混凝土中钢筋锈蚀的试验方法,其能很好地实现混凝土中钢筋的非均匀锈蚀,得到的钢筋锈蚀形态较传统的快速通电锈蚀法更接近自然锈蚀^[9]。

3 工业CT检测设备

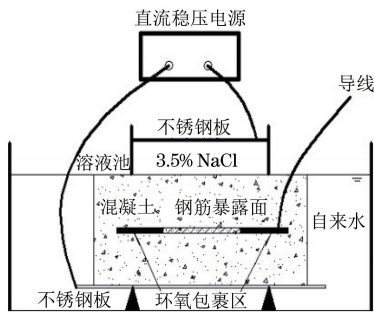
试验用工业CT系统型号为美国GE公司生产的phoenix VtomeX M300工业CT系统,其实物图片如图2所示。系统采用最高电压300 kV、最大功率500 W(300 kV时最大320 W)的微焦射线源。采用面板尺寸(长 \times 宽)200 mm \times 200 mm、面元尺寸(长 \times 宽)200 μm \times 200 μm 、灰度等级14 bit(位)的面板探测器。系统放大倍数从1.33倍到100倍,最大扫描直径为 ϕ 290 mm,机械系统高400 mm,重量20 kg,极限检测能力优于1 μm 。气孔检测能力优于0.1 mm(ϕ 40 mm钢)。在检测前,用数字射线成像技术(DR)对工件进行扫描,确定放大倍数。检测时试验参数为:射线源电压,230 kV;扫描电流,110 μA ;积分时间,1 000 ms;采样幅数,1 000;放大倍数,5.8。使用VG软件中尺寸分析模块分析CT图像中钢筋腐蚀情况及对腐蚀部位进行尺寸定量。



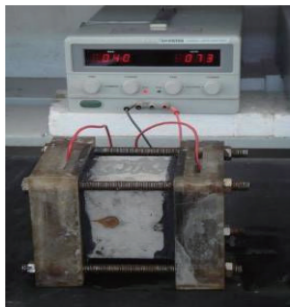
图2 试验用工业CT设备实物图片

4 钢筋混凝土试样制备

采用电迁移锈蚀法加速混凝土中钢筋锈蚀。加速腐蚀原理示意及锈蚀设备如图3所示,即接于电源负极的试验槽中置NaCl等电解溶液,正极试验槽中置NaOH等电解溶液,具体溶液类型可根据试



(a) 电迁移氯离子加速腐蚀原理



(b) 电迁移锈蚀设备

图 3 电迁移锈蚀法试验原理示意及锈蚀设备外观

验需要进行选取。通电方式采用恒流法,试验槽中

的电极首选铜电极。

对比试样所需的水、水泥、硅灰、粉煤灰、砂等主要材料均符合实用建筑材料要求,其实物图片如图 4 所示。使用浙江海螺 42.5 级普通硅酸盐水泥(P.O. 42.5),其具有耐腐蚀、容易搅拌、强度高、抗冻性优良等特性。水泥主要的物理力学性能如表 1 所示。试验用砂均为标准砂(普通河砂),其细度模数为 2.7,Ⅱ区级配合格,符合基准砂颗粒分布,在使用过程中,避免了砂受潮,确保达到标准规定的湿含量。试验用硅灰外观为灰色粉末,其是一种活性很高的火山灰物质,在物料中掺入硅灰,可以起到润滑作用;硅灰密度为 $2.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,比表面积为 $18\,500 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验用粉煤灰为镇海电厂Ⅱ级粉煤灰,其密度为 $2.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,比表面积为 $402 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验用磨细矿渣的密度为 $2.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,比表面积为 $436 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,其能在常温或者是水热处理条件下,与氢氧化钙发生化学反应,掺入混合料中可增强材料强度和耐久性。水泥、粉煤灰、硅灰等的化学组成如表 2 所示。试验主要材料配合比如表 3 所示。

表 1 P.O.42.5 水泥的物理力学性能

抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
3 d	28 d	3 d	28 d		
6.2	8.2	23.6	43.8	352	3.11

表 2 普通水泥、粉煤灰、矿渣、偏高岭土以及硅灰的化学组成

材料	质量分数/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量
普通水泥	24.5	4.5	3.5	55.2	4.0	2.0	2.2
粉煤灰	57.2	20.0	9.1	5.1	1.8	1.7	3.0
矿渣	30.3	6.5	0.8	51.9	4.7	3.1	—
偏高岭土	64.8	29.1	1.0	0.3	1.6	0.2	—
硅灰	91.9	0.2	0.7	0.2	0.7	—	—

表 3 试验材料配合比

编号	水泥/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	偏高岭土/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水胶比	砂/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	石/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水	砂率/%
试样 1/2	430	64.5	0.4	620	1 150	172	0.35



(a) 水泥



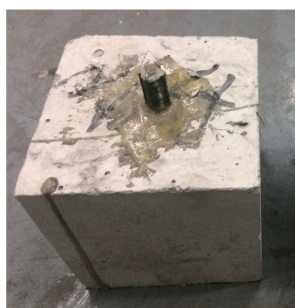
(b) 砂



(c) 碎石

图 4 试验原材料外观

对比试样采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)立方体模具盒制作,首先在模具盒内预先埋置 1 根直径为 10 mm 的 HRB335 建筑圆钢筋和 1 根直径为 10 mm 的 HRB335 建筑螺纹圆钢筋,试样标注为 1 号与 2 号试样,如图 5 所示。钢筋上段暴露长度约为 10 mm ,暴露部分用环氧树脂封裹,混凝土保护层厚度为 45 mm 。钢筋的化学成分(质量分数)为: $0.20\% \text{ C}$, $0.55\% \text{ Si}$, $1.42\% \text{ Mn}$, $0.026\% \text{ P}$, $0.028\% \text{ S}$,其余为 Fe 。混凝土试样成型 24 h 后脱模,并放入蒸气养护室中养护。在实验室环境中,采用电迁移锈蚀法对 1 号圆钢筋进行加速锈蚀,锈蚀时间为 30 d 。



(a) 1号试样



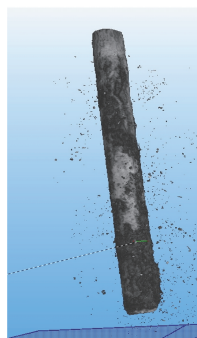
(b) 2号试样

图 5 钢筋腐蚀预制试样外观

5 试验结果与分析

对试样中腐蚀钢筋与未腐蚀钢筋进行工业 CT 扫描,得到预制混凝土试样的三维 CT 图如图 6 所示。从图 6(a)中可看出 1 号试样钢筋发生了腐蚀生锈,并且锈蚀布满整条钢筋。图 6(b)中 2 号试样钢筋未发现有腐蚀现象。图 7 为试样的轴向剖面 CT 图,其中 1 号试样轴向剖面 CT 图中密度有明显的变化,图中显示的高密度区域为混凝土中钢筋的所在区域,可以明显发现,钢筋周围出现与基体混凝土不同的密度区域,该区域的密度既不同于钢筋密度也不同于混凝土密度,其是钢筋腐蚀后产生的氧化铁与混凝土界面处的钢筋腐蚀区域。密度最低的灰度区域为混凝土或者其他缺陷等所在区域。在图

7(a)中找出一处钢筋腐蚀最为严重的位置并提取出其层析 CT 图像,图 8 为 1 号试样某位置端面的 CT 层析图像,采用 VG 软件中的测量模块分析 CT 图像,测得密度过渡区域钢筋腐蚀部分尺寸为 2.18 mm 。

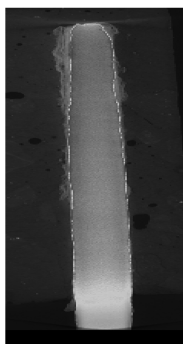


(a) 钢筋腐蚀三维CT图

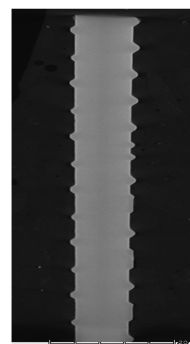


(b) 钢筋未腐蚀三维CT图

图 6 混凝土试样内部钢筋工业 CT 扫描三维图



(a) 钢筋腐蚀剖面图



(b) 钢筋未腐蚀剖面图

图 7 混凝土试样内部钢筋轴向剖面工业 CT 图

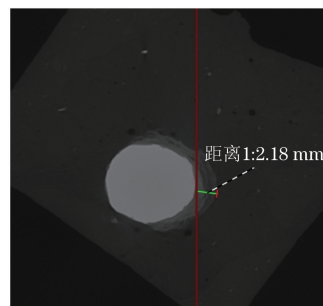


图 8 1 号试样某端面腐蚀的 CT 图像

从 CT 图像上找出预制标样钢筋腐蚀最严重部位,经解剖抛磨后,制成金相试样,用德国 ZEISS Imager.A2m 金相显微镜进行观察,并用 OLYMPUS 相机拍照。在 50 倍放大镜下,找出最大腐蚀位置,测量出钢筋腐蚀部分尺寸为 2.16 mm ,如图 9 所示。可见,金相测量结果与采用 CT 得到的检测结果一致。

由图 6(b)所示的 2 号试样的三维 CT 图像可看出:混凝土中钢筋表面光洁而无类似腐蚀斑点,钢筋表面的标志清晰可见,钢筋-混凝土界面区未见区别



图9 图8中腐蚀位置的剖面金相图像(50倍)

于钢筋及混凝土的密度过渡区域,混凝土中钢筋完好无损,表明钢筋未发生腐蚀现象。

6 结论

(1) 通过比较试样CT图像与解剖实物可发现,CT图像测量尺寸与实物解剖图测量尺寸一致,表明工业三维CT检测技术能够直观地测量出钢筋腐蚀的精确尺寸,能够满足实际检测应用要求。

(2) 由CT图像的密度值分析可知,由于钢筋、混凝土、腐蚀区域与孔洞缺陷的密度值存在着明显的差异,因此钢筋在混凝土内部的腐蚀过程可以通过直观地精确测量区域的密度变化来进行比较分

析,可见采用三维CT检测技术能有效地表征钢筋的腐蚀进程与腐蚀程度。

参考文献:

- [1] 罗刚,施养抗.钢筋混凝土构件中钢筋锈蚀量的无损检测方法[J].福建建筑,2002,79(4):55-57.
- [2] 牛荻涛.混凝土结构耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003.
- [3] 张伟平,张誉,刘亚芹.混凝土中钢筋锈蚀的电化学检测方法[J].工业建筑,1998,28(12):21-25.
- [4] 倪培君,王爱华,李旭东,等.工业CT技术在卫星产品检测中的应用[J].CT理化与应用研究,2000,12(9):119-123.
- [5] 傅健,路宏年,王宏钧.锥束准三代三维工业CT成像方法研究.兵工学报,2005,26(6):776-779.
- [6] 张誉,蒋利学,张伟平,等.混凝土结构耐久性概论[M].上海:上海科学出版社,2003.
- [7] 金伟良,赵羽习.锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究[J].工业建筑,2001,31(5):9-11.
- [8] 徐港,卫军,刘红庆.钢筋非均匀锈蚀试验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2006,34(5):116-119.
- [9] 费红芳.钢筋混凝土结构电迁移加速锈蚀法研究[D].宜昌:三峡大学,2012.

(上接第9页)

实际上,缺陷尤其是小缺陷能否检测出来,还很大程度地依赖于系统的对比度灵敏度。通过增加采样幅数、微动次数、切片厚度、扫描电流等降低噪声、增加对比度灵敏度的手段对小缺陷的检出是比较有利的。图2(b)是增加采样幅数和微动次数后的CT图像,在其上可清晰发现0.3 mm人工孔,但检测时间增加了5倍,可见该检测质量是靠牺牲检测效率来得到的。

3 结论

从检测结果图像可以清晰地发现0.5 mm人工模拟缺陷,验证了检测工艺的正确性,证明了基于采样理论推导出的工艺参数取值公式是可行的。

参考文献:

- [1] 张祥春,张鹭,王俊涛.工业CT技术在航空发动机单晶叶片壁厚测量中的应用[J].无损检测,2015,37(2):20-22.
- [2] 蒋绍青,栾传彬,满月娥,等.工业CT在大型复杂机匣检测中的应用[J].无损检测,2017,39(2):18-21.

- [3] ASTM E 1441-2011 Standard guide for computed tomography (CT) imaging[S].
- [4] ASTM E 1570-2011 Standard practice for computed tomography (CT) examination [S].
- [5] ISO/DIS 15708-1-2016 Non-destructive testing-radiation methods-computed tomography-part1: principle, equipment and samples[S].
- [6] GJB 5312-2004 工业射线层析成像(CT)检测[S].
- [7] GB/T 29070-2012 无损检测 工业CT检测通用要求[S].
- [8] GB/T 29071-2012 无损检测 火工装置的工业CT检测方法[S].
- [9] 何凯,晏磊,赵红颖.基于人眼视觉分辨力的数字影像质量评价方法研究[J].北京邮电大学学报,2005,28(S1):127-131.
- [10] 曾明,张建勋,王湘晖,等.基于视觉特性和复杂度加权处理的图像增强新算法[J].光电子激光,2005,16(3):363-367.
- [11] KARUNSEKERA S A, KINGSBURY N K. A distortion measure for blocking artifacts in image based on human visual sensitivity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(6):173-176.