

不同湿度水泥基材料的氧气扩散系数测定装置

刘承斌¹, 付传清², 周露泉¹, 金南国¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 300014)

摘 要: 提出了一种针对不同湿度条件的水泥基材料氧气扩散系数测试方法和试验装置。该装置主要包括供气系统、试件、左右气体腔室、湿度控制系统和传感测试系统。本装置的氧气扩散驱动力基于氧气浓度梯度, 可以真正实现不同环境模拟条件下的氧气扩散系数测定。实际应用结果表明: 根据预设环境条件, 该装置可以有效实现待测试件内部相对湿度的调节, 试验过程中参数稳定, 测试方法简单, 数据准确可靠, 可以满足科学研究和工程测试的实际需要。

关键词: 湿度; 水泥基材料; 氧气扩散; 测试方法; 试验装置

中图分类号: TU528-33 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1672-4305.2022.03.006



Test device of oxygen diffusivity determination for cement-based materials with different humidity

LIU Chengbin¹, FU Chuanqing², ZHOU Luquan¹, JIN Nanguo¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A test method and device of oxygen diffusivity coefficient determination in cement-based materials was presented corresponding to the different humidity conditions. This device mainly includes gas supply system, specimen, left and right gas chamber, humidity control system and sensing test system. The driving force of oxygen diffusion in this device is based on oxygen concentration gradient, which can really realize the measurement of oxygen diffusion coefficient under different environmental simulation conditions. The practical application results show that this device, according to preset environments conditions, can effectively realize the adjustment of the internal relative humidity of the specimen to be tested. This system has stable parameter, simple test procedure as well as accurate and reliable data, which thus can fulfill the practical needs of scientific research and engineering testing.

Key words: humidity; cement-based materials; oxygen diffusion; test method; test device

混凝土结构中钢筋的锈蚀是引起结构服役性能

下降的最主要因素^[1-3]。氯盐、水分和氧气的侵入是引起钢筋锈蚀的主要原因。针对海洋环境中的混凝土, 付传清等^[4]和张庆章等^[5]分别介绍了一种人工环境中模拟海洋潮汐作用的试验装置。当钢筋表面脱钝后, 空气中的氧气通过混凝土内部向钢筋表面扩散, 在不同湿度条件下, 混凝土中的氧气扩散系数直接决定了钢筋的锈蚀速率^[6-8]。因此, 作为混凝土中钢筋锈蚀的必要条件之一, 在不同湿度下的混凝土中氧气的扩散系数测定有着较为明确的科学

收稿日期: 2020-06-30 修改日期: 2020-08-21

作者简介: 刘承斌, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为结构试验技术。E-mail: lcb@zju.edu.cn

通讯作者: 付传清, 博士, 教授, 主要研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail: chuanqingfu@126.com

基金项目: 2016 年度国家自然科学基金(项目编号: 51678529)。

和工程应用价值。然而,由于混凝土自身材料的特点,其孔隙率低,气体扩散系数小,国内外至今尚无有效测定混凝土中氧气扩散系数的试验装置。

目前,已有的试验方法^[9-11]主要是针对混凝土中水、气的渗透性测定,亦即试验是在压力水或气体作用下进行的。所测定的结果是混凝土中的水、气渗透系数,而非扩散系数。实际上,氧气由钢筋混凝土表面向钢筋表面的传输,其机理为氧气的扩散作用。针对现有国内外水泥基材料中氧气扩散系数的测定方法及试验装置的不足^[12-14],周露泉等^[15-16]基于 Fick 扩散定律,提出了测定水泥基材料氧气扩散系数的测试方法和装置,测试方法简便有效,但只能用于干燥条件下试件的测试。随着环境影响因素的多样化,人们发现,湿度的变化对氧气扩散系数值影响较大。因此,研发一种针对不同湿度下水泥基多孔材料的氧气扩散系数测定方法和试验装置对科学研究和工程应用都具有很重要的意义。

针对以上研究的不足,本文拟设计一套可测量不同湿度环境下水泥基材料中氧气扩散系数的试验方法与装置,并给出不同湿度条件下水泥基多孔介质氧气扩散系数的详细测试步骤。该装置和试验方法将为基于海洋自然侵蚀条件下混凝土结构耐久性研究提供有力的支持。

1 试验装置设计

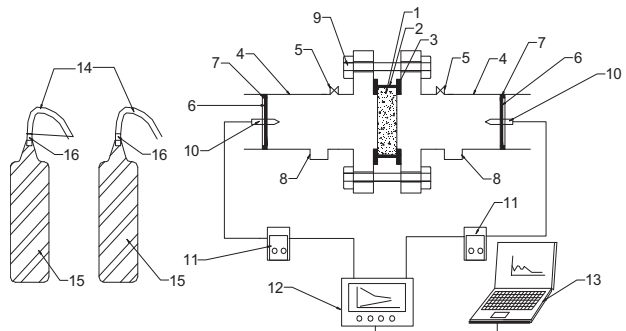
试验装置包括供气系统、试件、左右气体腔室和传感测试系统等部分,如图 1 所示。左右气体腔室分别包括进气阀门、腔室管壁、移动活塞、活塞密封圈和溶液池。进气阀门设置在腔室管壁上,移动活塞可移动地套装在腔室管壁内,设置活塞密封圈在移动活塞与腔室管壁的内壁之间,保证气体不会泄露,在腔室底部设有溶液池,用于保证腔室内湿度与试件湿度保持平衡。

供气系统由供气瓶、出气阀门与输气导管组成,供气瓶包括氧气瓶和氮气瓶,输气导管有两根,分别与供气瓶的出气阀门相连,两根输气导管的另一端与进气阀门相连。

传感测试系统用于测量水泥基试件左右两腔室中的氧气浓度,包括氧气传感器、氧气数据解调仪以及数据采集系统。氧气传感器安装在移动活塞靠近试件侧,与氧气数据解调仪连接。数据采集系统用于记录左右两腔室中的氧气浓度数据以及后续处理。

供气系统、试件、左右气体腔室和传感测试系统均位于恒温室内。移动活塞中部预留小孔,小孔内

安装氧气传感器。腔室腔壁均刻有刻度,用以计算两腔室的体积。两腔室的移动活塞主体采用透明有机玻璃制作,活塞密封圈采用丁腈橡胶,且各开有一直径 20mm 的小孔,用于和传感测试系统相连。



1、水泥基材料试件;2、环氧树脂;3、橡胶密封垫圈;4、腔室管壁;5、进气阀门;6、移动活塞;7、活塞密封圈;8、溶液池;9、双头螺栓;10、氧气传感器;11、氧气数据解调仪;12、数据记录仪;13、计算机;14、输气导管;15、供气瓶;16、出气阀门

图 1 试验装置设计图

2 测试方法与过程

2.1 试件准备

将通过切割机将浇筑成型并标准养护 28d 后的水泥基试件切割成若干个直径约 50~100mm,厚约 10~20mm 的圆柱形试件,然后置于饱和盐溶液密闭容器中,待达到内部湿度平衡后,采用环氧树脂将非扩散面(圆柱体侧面)涂覆,以隔绝外界空气的影响。

2.2 测试过程

2.2.1 整体装置连接及调试

将水泥基试件与左右两腔室用橡胶密封垫圈垫上后,再使用双头螺栓连接左右两腔室与水泥基材料试件,在垫圈周围等连接处涂覆适量凡士林,以保证气密性。在左右两腔室溶液池中注入足量相同浓度的饱和盐溶液。打开两腔室上部的进气阀门,在活塞密封圈外部涂上适量润滑油后,将移动活塞推至腔壁中,以排除腔室内原有气体,活塞处应在满足保证气密性的同时保持活塞的移动性。将氧气传感器放入左右两腔室移动活塞预留的小孔处,固定好以后涂抹凡士林以保证气密性。将氧气传感器另一端与氧气数据解调仪相连用于测试两腔室内的氧气浓度,并用数据采集系统采集相应的试验数据。腔壁上方的进气阀门通过输气导管与供气瓶相连,氧气腔室接氧气瓶,氮气腔室接氮气瓶,整个装置连接完成。

2.2.2 正式试验

打开供气瓶出气阀门与腔壁上部进气阀门,分别往两腔室内充气,使移动活塞匀速缓慢地向外移动,直至移动到腔室尾部,并用腔壁上刻度读出此时活塞距离试件端面的距离以计算腔室体积。打开与两腔室相连的已校准好的氧气数据解调仪,此时此刻记为 $t=0$,并用数据记录仪将此时两腔室中的氧气浓度记录并传输到计算机中。由于左右腔室内存在氧浓度差,氧气逐渐从高氧浓度腔室经过水泥基材料试件扩散至低氧腔室,在此过程中,由于饱和盐溶液的作用,整个装置内部湿度保持恒定。用记录仪记录下不同时刻下的两腔室中的氧气浓度。待两腔室氧气浓度接近时,此时两腔室浓度梯度很小,氧气继续通过水泥基材料试件的扩散量很小,停止试验,记录此时时刻 t 。

2.2.3 数据处理

结合以上所得数据,在该饱和盐溶液控制的不同湿度条件下,由于两腔室的氧浓度差,水泥基材料试件的氧气扩散系数可根据以下公式求得:

$$D_f = N / \left[\left(\int_0^t \frac{dC}{dx} dt \right) \cdot S \right] \quad (1)$$

式中: D_f 为氧气扩散系数 (m^2/s); dC/dx 为左右两腔室的氧气浓度梯度 (mol/m^4),可根据所记录的不同时刻下两腔室的氧气浓度值,利用 OriginPro 软件进行数据拟合,得到其与时间之间的函数关系; t 为试验时间 (s); N 为低氧腔室从 $t=0$ 至结束试验时增加的总氧气的物质的量 (mol); S 为氧气的有效扩散面积 (m^2)。

3 仪器搭设与测试

根据前面设计思路搭设了如图 2 所示的实物装置,采用有机玻璃制作了左右腔室,左边为氧气室,右边为氮气室,两个腔室底部均设置溶液池,试件夹在上述两个腔室中间,另外配两台氧气传感器感知左右两个腔室内氧气浓度信号,将记录数据传输到记录仪,从而搭设成一个系统试验装置。

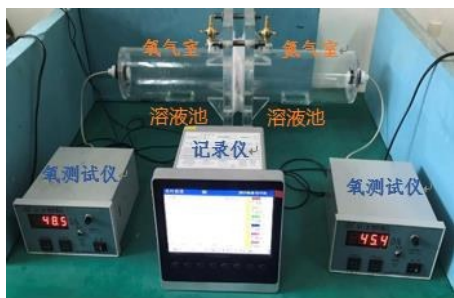


图 2 装置实图

试验时采用饱和乙酸钾溶液(在 288K 的温度下,可控制环境相对湿度 $\text{RH}=23.40\pm 0.32\%$),水灰比 0.53、配合比为水泥:水:砂子 = 1:0.53:2.0 的砂浆试件为例进行氧气扩散系数测定。拌制砂浆的原材料:水泥为 P.I 525 级波特兰水泥,砂采用细度模数 2.6 的河砂,水采用自来水。在养护室中标准养护 28d 后,将砂浆试件切成直径 75mm,厚 10mm 的圆柱形试件,将上述试件置于饱和乙酸钾溶液密闭容器中养护至内部平衡后,在试件侧面(非氧气扩散面)用环氧树脂涂覆以隔绝外界大气的影晌,进行氧气扩散系数的测试。

待整体装置连接完毕后,打开供气瓶,分别往两气体腔室中充入一定量的氧气与氮气,让氧气在浓度梯度作用下通过水泥基试件进行传输。整个试验过程中,由于溶液池中饱和乙酸钾溶液的作用,装置内部湿度始终保持恒定。利用氧气传感器与数据记录仪监测到不同时刻砂浆试件左右两气体腔室中的氧气浓度如表 1 所示。

表 1 氧气浓度随时间变化数据表

| $t(\text{s})$ | 氮气腔室氧 气浓度(%) | 氧气腔室氧 气浓度(%) |
|---------------|-----------------|-----------------|
| 0 | 1.5 | 31.9 |
| 16380 | 10.4 | 23.0 |
| 29880 | 13.5 | 19.9 |
| 72780 | 16.0 | 17.4 |
| 97380 | 16.2 | 17.2 |

可绘制得到氧气浓度随时间变化图(如图 3 所示),根据经数据处理后的试验结果,利用 OriginPro 软件进行数据拟合,可得到氧气浓度梯度 dC/dx 与时间 t 的函数关系如下:

$$f(t) = \frac{dC(t)}{dx} = 1259.2 \exp\left(-\frac{t}{17605}\right) + 40.74 \quad (2)$$

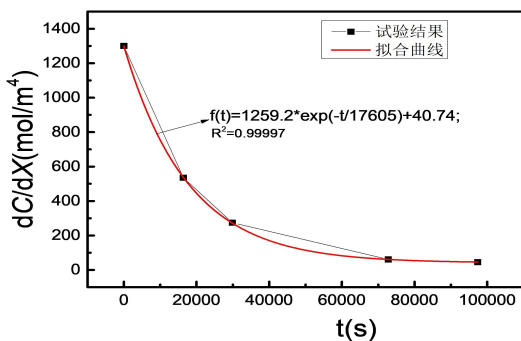


图 3 氧气浓度梯度随时间变化图



根据表 1 数据,在试验开始至结束时氮气腔室的氧气总增量 $N=0.008775\text{mol}$,结合式(1)以及 $t=97380\text{s}$,可求得氧气在砂浆试件中扩散系数为:

$$D_f = \frac{0.008775}{\int_0^{97380} \left[1259.2 \exp\left(-\frac{t}{17605}\right) + 40.74 \right] dt} \cdot 5.6 \times 10^{-3}$$

$$= 6.03 \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{s})$$

由文献^[14]可知,干燥条件下氧气扩散系数为 $7.8 \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{s})$,将两者进行对比后可以发现,随着湿度提高,氧气扩散系数降低,符合试验预期以及水泥基材料中氧气扩散的规律,试验结果真实可信。

4 结语

环境湿度变化对水泥基材料中的氧气扩散系数值具有较大影响,湿度增大会导致氧气扩散系数降低。本文介绍了一种氧气扩散系数的测试装置,并通过增设溶液池以放置不同物理性质的饱和盐溶液,以有效解决相对湿度控制的难题。该装置测试过程稳定,测试精度较高,且装置成本低、构造和测试过程简单,可以真正实现水泥基材料中氧气扩散系数的测定。将为耐久性试验和工程应用研究提供试验条件支持。

参考文献(References):

[1] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社,2011.

[2] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学出版

(上接第 20 页)

[2] Adrian R J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow—a review[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1986, 7(2):127-145.

[3] 唐洪武. 现代流动测试技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2009.

[4] 陈根华,詹斌,王海龙,等. 粒子图像测速发展综述[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(3):90-96.

[5] 张金良. 水库异重流研究与应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2019.

[6] Li T, Gao G M, Ma H B, et al. Theoretical Investigation into Plunging Point of Density Current in Reservoir[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 212-213(总):413-416.

[7] Xu Q, Moncrieff M W. Density Current Circulations in Shear Flows[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1994, 51(3):434-446.

[8] 范家骅. 异重流对工程的影响[C]. 2006年全国异重流问题学术研讨会论文集, 郑州:黄河研究会 黄河水利委员会.

[9] 范家骅. 异重流与泥沙工程:实验与设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

社,2003.

[3] 卢木. 混凝土耐久性研究现状和研究方向[J]. 工业建筑, 1997, 27(5):1-6, 52.

[4] 付传清,金贤玉,金南国. 人工环境中模拟海洋潮汐作用的试验装置[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(4):54-57.

[5] 张庆章,黄庆华,张伟平,等. 潮汐区海水侵蚀混凝土结构加速模拟试验装置[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(8):4-7.

[6] 耿欧,袁迎曙,朱辉,等. 混凝土氧气扩散性能的预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4):471-474.

[7] Hussain RR, Ishida T. Influence of connectivity of concrete pores and associated diffusion of oxygen on corrosion of steel under high humidity[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6):1014-1019.

[8] 付传清,何家豪,金贤玉,等. 带横向荷载裂缝钢筋混凝土梁的钢筋锈蚀形态研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1):123-131.

[9] 张禾,姚坤,王飞. 一种测定塑性混凝土渗透系数的试验装置[J]. 水利水电技术, 2012(6):97-99.

[10] 戴维,付传清,刘佳敏,等. 水泥基材料渗透系数测定方法及试验装置[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(6):94-97.

[11] 桂强. 水泥基材料气体渗透性研究[D]. 北京:清华大学, 2016.

[12] 耿欧,袁迎曙,朱辉,等. 混凝土氧气扩散系数试验研究[C]//第五届混凝土结构耐久性科技论坛, 2006:191-194.

[13] Sercombe J, Vidal R, GalléC, et al. Experimental study of gas diffusion in cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(4):579-588.

[14] 周露泉,金南国,付传清. 水泥基材料氧气扩散系数测定[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(7):117-120.

[15] 付传清,周露泉,金南国. 用于测定水泥基材料中氧气扩散系数的试验装置:中国, ZL201720538840. 2[P]. 2017-12-08.

[16] 周露泉,金南国,付传清,等. 干燥条件下水泥基材料中氧气扩散预测模型[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8):1133-1140.

[10] 乐培九. 引航道异重流运动及其淤积[J]. 水道港口, 1992(1):1-7.

[11] 王燕. 黄河口高浓度泥沙异重流过程:现场观测与数值模拟[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.

[12] 纪道斌,刘德富,杨正健,等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(6):691-696, 702.

[13] 周可涵. 基于反坡异重流的盐水入侵及水环境影响研究[D]. 福州:福建师范大学, 2017.

[14] 房玉喜. 刘家峡水库异重流排沙标准的调整及实施效果分析[J]. 甘肃电力, 1997(4):1-8.

[15] 练继建,万毅,张金良. 异重流过程的梯级水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1):18-23.

[16] 曹彪,付用军,杨子江,等. 基于岗位的工程力学实验内容改革与实践[J]. 实验室科学, 2018, 21(2):170-173.

[17] 王吉会,赵乃勤,李宝银,等. 创建实验教学新体系培养学生创新能力[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(3):8-9.

[18] 吕念玲,袁炎成,黄晓梅,等. 实验教学重在过程[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(6):154-156, 171.