第 54 卷第 2 期
2026 年 2 月
硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY
Vol. 54，No. 2
February，2026
http://jccsoc.cbpt.cnki.net
DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250611

基于 X 射线成像可视化定量表征砂浆中水分传输的方法

黄小明[1]，高卫博[1]，周隆炎[2]，王煦[1]，陈瑾逾[1]，董必钦[1]，洪舒贤[1]

(1. 深圳大学土木与交通工程学院，广东省滨海土木工程耐久性重点实验室，广东 深圳 518000；
2. 深圳市深水布吉水质净化有限公司，广东 深圳 518000)

摘 要：水分作为影响水泥基材料耐久性的重要因素，实现水分含量的定量测量是表征水泥基材料耐久性的关键。本研究提出了一种基于 X 射线成像技术的外部标定方法，建立已知含水量与 X 射线之间的非线性衰减关系，解决大尺寸砂浆试样引起的 X 射线非线性衰减，实现砂浆试样中水分含量的定量表征。该方法基于水泥–水两相模型，通过设计水泥和水的叠加校准模型，获取水分厚度与 X 射线透射率之间的拟合关系，对不同水灰比、胶砂比和砂粒径的砂浆进行毛细吸水，对比不同砂浆试样中水分传输的一维和二维分布演变，实现不同砂浆试样中水分含量的可视化定量，并以称重法进行验证。与重量法相比，该方法测得的水分含量最大相对误差为 4.8%。

关键词：X 射线成像；砂浆；水分传输；标定方法
中图分类号：TU528.041　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0542–14
网络出版时间：2026–01–26

水分传输在混凝土中的研究具有至关重要的意义，作为一种广泛应用于建筑、基础设施等领域的工程材料，混凝土的性能直接影响到结构的安全性和耐久性[1, 2]。然而，在混凝土基础设施的使用过程中，劣化问题深受冻融、氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀等外界因素影响[3]，这会导致混凝土发生腐蚀进而影响其耐久性，而混凝土的劣化均以水分作为侵蚀媒介，水分参与了大部分的劣化过程[4–6]，因此水分传输的定量表征是混凝土耐久性研究的基础性问题。

近年来，X 射线投影成像(XR)作为一种快速、非接触的测量工具，在研究水泥基材料中的水分传输方面得到了广泛应用[7–9]。与 X 射线断层扫描(XCT)不同，XR 采用单一方向的 X 射线穿透物体，快速的形成一张二维的影像，其主要利用材料对 X 射线的吸收实现成像。对于水泥基材料来说，当水分进入水泥基材料后，X 射线的吸收和密度逐渐增加，从而导致 X 射线图像中灰度值发生变化，理论上，这些灰度值的变化可以表示为含水量的增加或减少。与其他常见方法相比，XR 具有独特的优势。首先，它能够提供足够的分辨率和较好的时间效率，有效捕捉复杂结构中的水分传输过程[10]，而传统的称重、电学[11]或超声波[12]的方法往往无法达到这样的效果。其次，与磁共振成像(MRI)[13]和 X 射线相位成像(XPCI)[14]等技术相比，X 射线投影成像对于样品的适用性更为广泛，对材料特性和尺寸没有严格要求。最后，XR 在成本控制和设备获取方面也具有一定优势，相比于中子放射成像(NR)[15]等方法，大大降低了检测成本。

目前，国内外研究学者利用 X 射线吸收成像对水泥基材料中水分传输的表征已有一些成果。在早期的研究中，X 射线吸收可以直接用来评价水泥基材料中的水分运动，实现水分传输的半定量[16, 17]。当 X 射线穿透距离较短，即目标材料的厚度较薄时，如果假设 X 射线呈线性衰减，对于水泥试样中水分传输的定量是相对容易的，Lukovic 等[18]则是利用含水量与灰度的线性关系，通过 X 射线吸收量化了胶结修复材料与砂浆基板之间的水传输。Zheng 等[19]使用 X 射线衰减较高的氯化铯作为造影剂，以增强毛细管吸收，并得到含有不同浓度氯化铯溶液的灰度与含水量之间的线性关系，实现水分的标定。在

收稿日期：2025–08–13。　修订日期：2025–09–12。
基金项目：科技部国家重点研发计划(2022YFB2602600)。
第一作者：黄小明(1998—)，男，博士研究生。
通信作者：洪舒贤(1982—)，女，博士，教授。

Received date: 2025–08–13.　**Revised date**: 2025–09–12.
First author: HUANG Xiaoming (1998–), male, Doctoral candidate.
E-mail: hh575212022@163.com
Correspondent author: HONG Shuxian (1982–), female, Ph.D., Professor.
E-mail: sxhong@szu.edu.cn

随后的工作中，Zheng 等[20]在高电压下利用灰度包络面积的理论建立水分传输过程的线性标定曲线，在增加滤镜后，假设高电压下 X 射线呈现线性衰减，以此实现水泥净浆中水的定量。

对于砂浆来说，其中的成分(如水泥、砂、外加剂等)需要充分混合，较大的样品才可以更好地保证样品内部的均匀性，当多色的 X 射线穿透厚的砂浆试样时，低能量 X 射线(波长较长)更容易被物质吸收，而高能量 X 射线(波长较短)则能穿透得更远，导致 X 射线越来越“硬”[21, 22]。同时，X 射线与试样的相互作用(吸收或反射)会随穿透距离的增加而增加，导致 X 射线呈非线性变化，因此进行水分的标定是必要的[23]。通过设计不同含水量的标定样品来研究水分含量与 X 射线透射率的关系，利用外部校准实现厚样品中的水分含量校正是一种较好的标定方法。Wang 等[23]通过采集一对干湿阶梯型试样的 X 相片，基于水泥–水两相外部标定方法对水泥净浆中的水分含量进行定量，建立了 X 射线图像灰度与不同厚度水泥净浆的含水量衰减系数曲面，实现了不同厚度水泥净浆中水的定量。该方法通过设计水泥–水两相的外标试样，解决了外标水泥样品有既定的含水量并且均匀分布这一难点，但针对多种类的水泥试样来说，需要重复制备外部试样，尤其对于砂浆试样来说，阶梯型模具的制备相对复杂。同时该方法只考虑了水泥和水的这 2 个参数，当砂子这一组分存在时，还需要构建新型衰减系数曲面，增加了该定量方法的复杂性。

本研究提出了一种基于水泥–水两相的外部校准模型的砂浆泥样品水分含量的标定方法，该方法通过设计制备 1 个三棱柱外部标定模型，获得了水分含量与 X 射线透射率之间的校准曲线，避免了针对不同的水泥砂浆试样，需要额外制备外部校准模具的复杂过程。为了验证该方法对于不同配合比样品的适用性和准确性，制备了不同水灰比、胶砂比和砂粒径的砂浆试样，通过该校准曲线标定了各砂浆样品在毛细吸水过程中的水分含量，最后，通过称重法验证了所提出方法的准确性。

1　测量原理

1.1　物理原理

当一束单色 X 射线光子击打在单一组分且均匀的材料中时，X 射线的强度会随着其穿透长度而衰减，如式(1)所示。

$$\ln(I / I_0) = -\mu d \tag{1}$$

式中：I 为 X 射线穿透后的强度，本工作中以图像灰度表示；I_0 则是 X 射线的初始强度，以空白场的灰度表示；μ 为材料的衰减系数；d 为通过物体的 X 射线路径的长度，即物体的厚度(m)。

由于实验室中的 X 射线是由 X 射线管中的高速电子撞击靶材料产生的，撞击过程中，电子的动能被转化为 X 射线，然而产生的 X 射线并非单一波长，而是具有一个从低能到高能的能量范围，通常无法实现单色 X 射线束，因此多色 X 射线的穿透可以拓展为式(2)。

$$-\ln(I / I_0) = \int \mu(E) d\mathrm{d}E \tag{2}$$

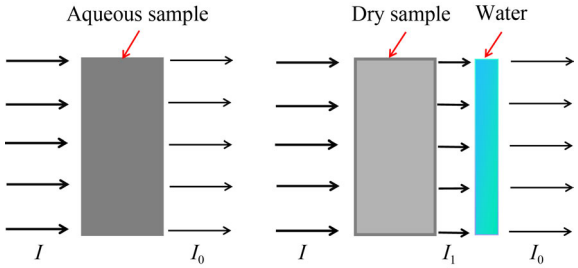
式中：E 为 X 射线能量，keV。

像砂浆这样的多组分材料，水泥、骨料和水成分比例的变化会引起 X 射线强度的变化[24]。根据比尔定律，各种物相的衰减系数都是入射 X 射线能量的函数，衰减系数取决于原子序数或简单材料的体积密度[25]，因此根据其组分数量分别计算其 X 射线强度，得到其 X 射线透射规律式(3)。

$$-\ln(I / I_0) = \mu_c \rho_c d_c + \mu_s \rho_s d_s + \mu_w \rho_w d_w \tag{3}$$

式中：μ_c 为水泥的衰减系数；ρ_c 为水泥的密度，g·cm^{-3}；d_c 为水泥的厚度，cm；μ_s 为砂的衰减系数；ρ_s 为砂的密度，g·cm^{-3}；d_s 为砂的厚度，cm；μ_w 为水的衰减系数；ρ_w 为水层密度，g·cm^{-3}；d_w 为水的厚度，cm。

对于水泥净浆中的自由水来说，水和水泥通常被视为 2 个不同的组成部分，含水的水泥净浆可以视为干燥的水泥与自由水层的水泥–水两相组合，水泥净浆中不同水含量代表不同厚度的自由水层，如图 1。X 射线穿透整个试样的过程中，水泥保持不变，不会与自由水引起的衰减混淆[26]，因此，自由水引起的衰减则可以通过含水试样与干燥试样的 X 射线衰减差进行计算。



I is initial intensity of X-ray; I_0 is X-ray intensity after penetration; I_1 is X-ray intensity during penetration.

图 1　水泥净浆的水泥–水两相组合模型

Fig. 1　Cement–water two-phase combination model of cement paste

而含水砂浆试样可分为干燥的水泥、砂以及单独的水层，由于干燥试样中水泥和砂的密度和

厚度未知，其对应的衰减系数 μ 的值难以计算。因此，在式(3)的基础上，只要得到水层的有效衰减系数和 X 射线透射率之间的关系即可获取其中的水分含量。

$$-\ln(I_{\mathrm{w}}/I_{\mathrm{w}0})=\mu_{\mathrm{w}}d_{\mathrm{w}} \tag{4}$$

式中：$-\ln(I_{\mathrm{w}}/I_{\mathrm{w}0})$为纯水的 X 射线透射率，本工作中表示为砂浆试样吸水前后的透射率差值；I_{w} 为纯水的灰度，$I_{\mathrm{w}0}$ 为空白场的灰度。

式(4)中的 μ_{w} 独立于 X 射线源的 E，不同能量光子的质量衰减系数不能保持不变，由于 X 射线的非线性衰减带来的影响，随着样品内传输距离的增加，即使水分脱离干试样存在，但 E 仍会发生变化。

$$-\ln(I_d/I_0)=\int_0^D \mu(E(d))\mathrm{d}d \tag{5}$$

式中：I_d 为厚度为 d 时的 X 射线穿透强度；D 为厚度的积分上限，cm。

因此，试样中 μ_{w} 随传输距离的变化而变化，为了获得 μ_{w} 的解析解，仍然需进行校准过程，但由于纯水的衰减系数难以获取，即使同一厚度下的水分，在不同砂浆试样中的 X 射线透射率结果也不一致，因此直接通过水分的射线透射率与厚度之间的关系对试样中的水分进行定量是不可行的。

1.2 标定方法

为了利用水泥–水两相的外部标定方法实现砂浆试样中含水量的标定，获取 μ_{w} 的解析解。本研究设计构思了一种三棱柱的水层试样模具，如图 2 所示，水分可以直接灌输在棱柱中，在 X 射线衰减过程中，形成了干燥砂浆–水层的叠加模型，该模型中的水层厚度是从 0 到 d_{w} 的水层厚度，三棱柱中最大厚度设置为最大含水量时，根据吸水面积(h×b)从而计算得到具体的水层厚度。

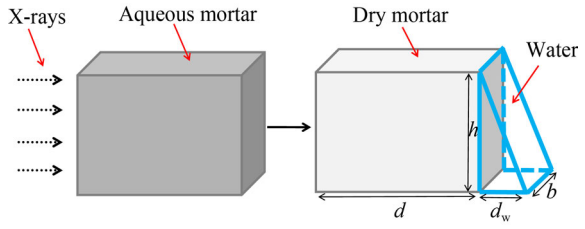


图 2 水泥砂浆的标定模型

Fig. 2 Calibration model of cement mortar

该模型通过在干燥砂浆试样中叠加三棱柱纯水试样，以模拟砂浆中的不同水分厚度，在考虑砂浆试样存在的情况下得到了水分厚度与 X 射线透射率之间的联系，但此时的 X 射线透射率结果包含砂浆和水分，为了获取水分衰减系数的解析解，可以通过含水三棱柱标定模型与不含水三棱柱模型之间的 X 射线透射率的差值作为实验值，直接建立了不同已知水分厚度与纯水分的 X 射线透射率之间的标定曲线。

通过 X 射线投影获取砂浆试样毛细吸水前后的 X 射线透射率，作差之后得到–ln(I_{w}/$I_{\mathrm{w}0}$)值，代入标定曲线中获取了水分厚度，并转化为水分质量，从而实现砂浆试样毛细吸水过程中的水分定量。该标定模型适用于同一厚度下所有的砂浆试样，不需要针对不同砂浆试样重复制备标定模具，有效降低了标定样和测试样之间的差异性带来的标定误差。

在水泥砂浆的吸水过程中，吸水面积不变(h×b)，水层厚度随吸收时间逐渐增加，即水层厚度的增加导致 X 射线的衰减增大。在图 2 中，棱柱的顶端和底端假设为厚度为 0 到厚度为 d_{w} 的水层厚度，这里的描述如式(6)所示。

$$d_{\mathrm{w}}=\frac{m_{\mathrm{w}}}{\rho_{\mathrm{w}}A_{\mathrm{s}}} \tag{6}$$

式中：m_{w} 为水分质量，g；A_{s} 为给定虚拟水层的像素的表面积，cm^2，A_{s} 保持不变。在毛细吸水过程中，水层的厚度发生变化。对于该标定模型，取每一个沿试样高度对应的厚度作为水分厚度。

1.3 测量流程

基于水泥砂浆标定模型的 XR 定量测试流程图如图 3 所示。测试前，明确水泥砂浆样品的材料信息，如水泥和砂的类型、制备方法、养护和干燥过程，该定量模型中的标定试样和测试试样一致，定量结果适用于测试样品。同时，各测试样品完全干燥后，测量测试样品的最大含水量，随后根据结果确定三棱柱模型的尺寸。

定量测量过程主要分为 3 个部分，对于校准过程，针对各试样的标定模型进行 X 射线投影，通过场不均匀性校正 X 射线投影误差[20]，获取了图 2 所示的原始标定模型的 X 射线二维图像，图像结果以 h×b 面的像素格组合表示，其中，每个像素格中的数据表示为 X 射线透射率，该值是通过试样的灰度(I)和空白场的灰度(I_0)计算得到，如式(1)所示，如图 4a 所示；随后将水分灌入三棱柱中，获取含水分三棱柱标定模型的像素格图像，如图 4b 所示；最后计算两者之差，最终得到–ln(I_{w}/$I_{\mathrm{w}0}$)值，如图 4c 所示，以此得到了图像中每行–ln(I_{w}/$I_{\mathrm{w}0}$)的平均值与图像高度 h 之间的关系，而高度 h 对应 d_{w}，通过多项式拟合得到–ln(I_{w}/$I_{\mathrm{w}0}$)与 d_{w} 的标定曲线。

在测试过程中，所有砂浆试样在干燥后，四周涂抹环氧树脂，在水箱中进行毛细吸水实验，毛细吸水前需要进行 X 射线投影成像和称重，记为初始

时刻的图像，随后对每次吸水后的砂浆试样进行 X 射线投影并称重，通过场不均匀性校正吸水后的空间水分分布，得到了不同吸水时刻与初始时刻的 $-\ln(I/I_0)$值以及其对应的吸水质量。

最后，获取了所有吸水后砂浆图像中各像素格中所对应的$-\ln(I_w/I_{w0})$值，将$-\ln(I_w/I_{w0})$值代入测试过程中所得到的各砂浆试样的标定曲线，得到了试样中的水分质量分布，并计算了最终的吸水质量，以称重得到的吸水结果进行验证。为避免过拟合和外部噪声干扰，同时兼顾拟合精度与函数稳定性，因此本工作中的标定曲线采用二次多项式拟合，表达式如式(7)所示。

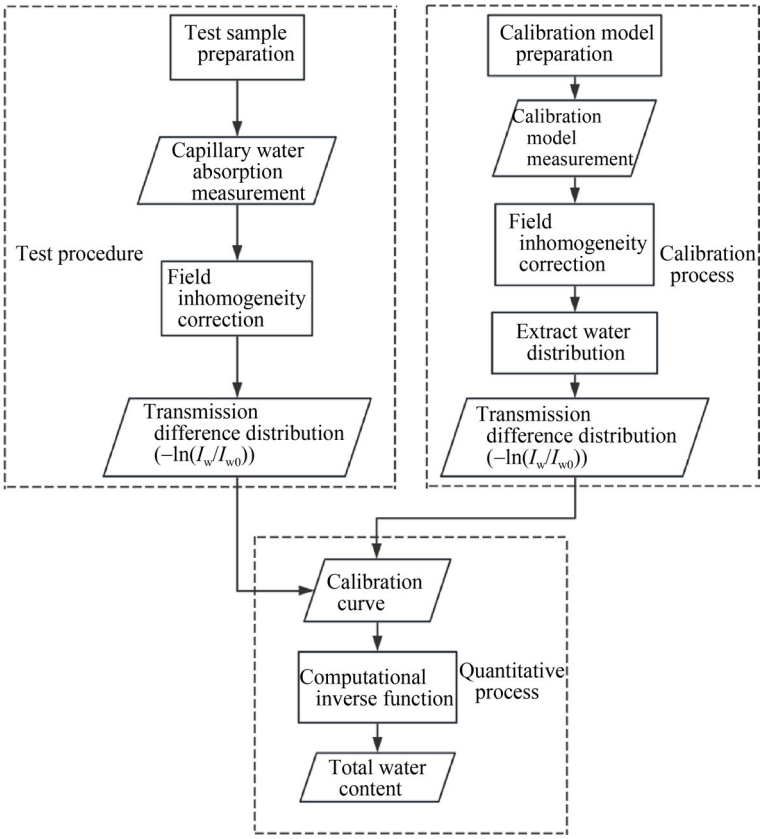
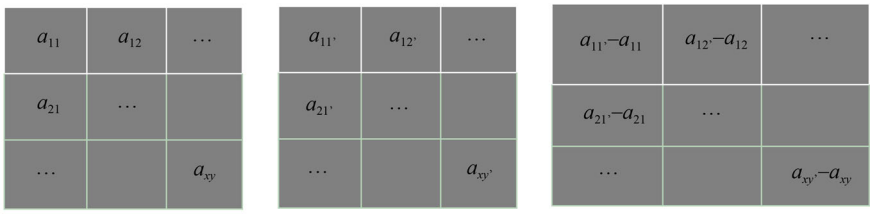


图 3　砂浆的定量测试流程图

Fig. 3　Flow chart of quantitative test of mortar



(a) Pixel grid of initial image　(b) Pixel grid of image after water absorption　(c) Pixel grid of moisture image

a_{xy} is the transmittance of X row and Y column in initial image matrix; a_{xy}' is the transmittance of X row and Y column in image matrix after water absorption.

图 4　X 射线透射率差值[$-\ln(I_w/I_{w0})$]提取过程

Fig. 4　Extraction process of X-ray transmittance difference ($-\ln(I_w/I_{w0})$)

$$-\ln(I_w/I_{w0}) = a + b_1 d_w + b_2 d_w^2 \quad (7)$$

式中：a、b_1 和 b_2 为回归系数。

2　实验

2.1　样品制备

根据 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》[27]，使用水、砂和 P·O42.5 普通水泥制备了尺寸为 40 mm×20 mm×60 mm (h×b×d，高×宽×厚)的砂浆试样。水泥的相关指标如表 1 所示，砂的相关指标如表 2 所示，具体配合比及样品命名如表 3 所示，砂浆试样主要包括不同水灰比、灰砂比和砂粒径的 8 组试样。所有试样均在 20 ℃和相对湿度为 95%的标准养护室内养护 24 h 后脱模，随后样品在标准养护室中进一步养护 28 d，养护结束后在 60 ℃的干燥箱中干

燥，直至试样的相对质量变化在 24 h 之内保持在0.1%以内。

表 1 水泥的相关性能指标

Table 1 Related performance indexes of cement

Sample	Density/ ($kg·m^{-3}$)	Specific surface area/($m^2·kg^{-1}$)	Requirement of normal consistency/%
Cement	3120	332	25.6

表 2 砂子的相关性能指标

Table 2 Related performance indexes of sand

Sand type	Density/($kg·m^{-3}$)	Fineness modulus	Particle size of sand/mm
Standard sand	2620	2.51	0.08–2.00
River sand	2540	2.62	0.5–1.5
River sand	2540	2.93	1.5–3.0
River sand	2540	3.20	3–5

表 3 砂浆配合比

Table 3 Mix proportions of mortar

Sample No.	Sand type	W/C	C/S	Particle size of sand/ mm
0.4_1:1_S1	Standard sand	0.4	1:1	0.08–2.00
0.5_1:1_S1	Standard sand	0.5	1:1	0.08–2.00
0.6_1:1_S1	Standard sand	0.6	1:1	0.08–2.00
0.5_1:2_S1	Standard sand	0.5	1:2	0.08–2.00
0.5_1:3_S1	Standard sand	0.5	1:3	0.08–2.00
0.5_1:1_LS2	River sand	0.5	1:1	0.5–1.5
0.5_1:1_MS2	River sand	0.5	1:1	1.5–3.0
0.5_1:1_HS2	River sand	0.5	1:1	3–5

W/C is water cement ratio; C/S is cement sand ratio.

标定模具则是利用对 X 射线吸收较少的聚丙烯塑料薄片制成，聚丙烯的原子序数较低，薄片的厚度(0.1 mm)也比较薄，因此 X 射线穿透时的衰减程度较小，对 X 射线的衰减影响较小。模具中装入水，标定模具适用于测试样品，三棱柱的尺寸(h×b)与测试样品一致，其中厚度 d_w 对应的含水量是覆盖试样的最大含水量，如图 5 所示，不同试样的最大含水量如表 4 所示，根据所有试样的最大含水量结果，设计厚度 d 为 20 mm 三棱柱模具，以砂浆试样的最大含水量为 16 g 为参照，标定模具的固定尺寸为 40 mm×20 mm×20 mm (h×b×d)。

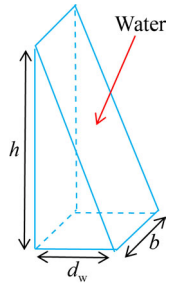


图 5 三棱柱标定模具示意图

Fig. 5 Schematic diagram of triangular prism calibration die

表 4 不同砂浆试样的最大含水量

Table 4 Maximum water content of different mortar samples

Sample No.	Quality of dried sample/g	Quality of saturated sample/g	Quality of water absorption/g
0.4_1:1_S1	93.20	104.51	11.31
0.5_1:1_S1	87.73	100.76	13.03
0.6_1:1_S1	80.88	94.51	13.63
0.5_1:2_S1	98.64	108.35	9.71
0.5_1:3_S1	98.12	106.20	8.08
0.5_1:1_LS2	90.59	104.51	13.92
0.5_1:1_MS2	89.15	102.35	13.20
0.5_1:1_HS2	86.40	98.31	11.91

2.2 设备参数

实验中使用了 X 射线计算机断层扫描设备(microxct-400；Xrandia 公司，美国加利福尼亚州普莱森顿)的射线投影模式。X 射线由像素值为 1024×1024 的 CCD(探测器)相机记录。收集的 X 射线投影数据(灰度)以原始 Tiff 格式导出，灰度值保存为 16 位数据，范围为 0~65 535。为了便于计算，利用空白场将图像的灰度转化为 X 射线透射率，X 射线管的电压分别设置为 120 kV，功率则分别设置为 9 W，曝光时间设定为 8 s。

同时，使用滤镜的方法来过滤低能的 X 射线，从而加强 X 射线衰减系数与水分含量之间的线性关系，提高图像的对比度。随着滤镜等效铝厚度的增加，单色性越好[28–29]，单色性计算公式如式(8)所示。因此本工作中使用 HE6 的滤镜，以厚度为 30 mm 的铝片进行 X 射线的单色性评价，具体结果如表 5 所示。使用滤镜后，X 射线光子的单色性达到了 0.934，较未使用滤镜的单色性提高了 15%。

$$\alpha = \frac{2\mu(d_1 + d_2)}{\mu_1(d_1) + \mu_2(d_2)} \tag{8}$$

式中：$\mu_1(d_1)$和 $\mu_2(d_2)$分别是样品厚度为 d_1 和 d_2 时的衰减系数；$\mu(d_1+d_2)$是厚度为 d_1+d_2 的衰减系数，理论上，对于单色 X 射线光束，样品中的衰减系数应该随厚度呈线性相关，因此 α=1。

表 5 滤光片为 HE6 的单色性结果

Table 5 The result of the monochromaticity of HE6

X-ray tube voltage/kV	Model of filter	Equivalent aluminum thickness/mm	α
120	HE6	9.61	0.934
120			0.811

α is monochrome evaluation coefficient.

2.3 测量和验证过程

本工作通过毛细水吸收实验验证了所提出方法的可行性，实验中，将完全干燥后的样品四周

($h\times b$，$h\times d$) 涂抹环氧树脂并置于水箱中，底部始终浸入水中，毛细作用使水分进入样品内部，实现了一维的水分传输，在此过程中，水分沿样品垂直向上传输。实验前拍摄空白的干燥试样并称重，确定拍摄位置并标记，保证每次拍摄位置一致，每隔 30 min，样品从水箱中取出，表面擦干以去除自由水，称重后放入 X 射线投影设备中进行成像。根据图 3 所示的流程图，获取并处理了一系列时间序列的 X 射线投影的二维图像，以计算不同时间点下砂浆试样中的水分含量。记录每张 X 射线投影照片对应的样品质量变化，提供样品在不同时间点实际含水量变化的参考值，以此评价 XR 定量方法的误差。

3　结果与讨论

根据 2.1 节中获取的各试样最大含水量结果，设计制备了纯水塑料模具在 X 射线成像设备中进行实验，样品放置在铝合金平台上，并使用标记物保证每次拍摄位置一致。标定前拍摄原始砂浆试样与不含水模具的 X 相片，随后拍摄原始砂浆试样与含水模具的 X 相片，两者的拍摄参数一致，样本区域相同，随后对获得的 X 相片进行场不均匀性校正[19, 30–31]，为了展示该校正结果的有效性，以均匀铝板的校正为例，校正前后的 X 相片如图 6 所示。

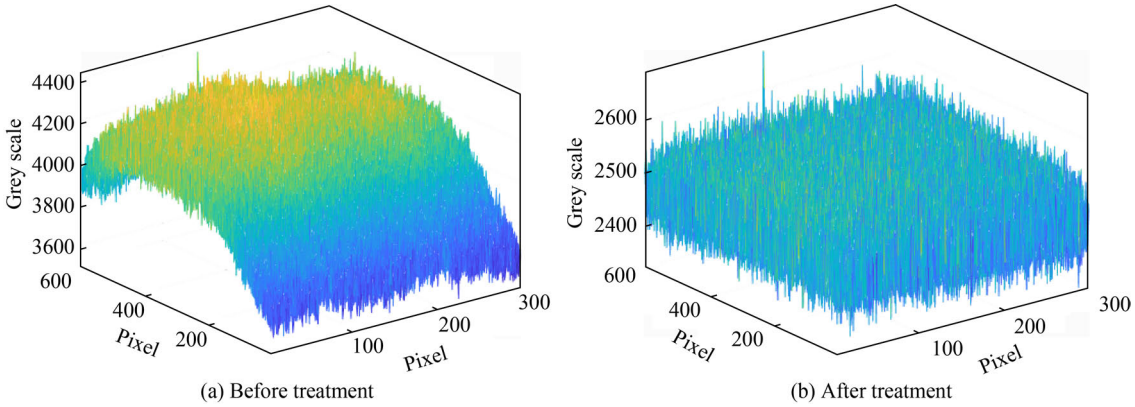


图 6　场不均匀校正前后的二维图像

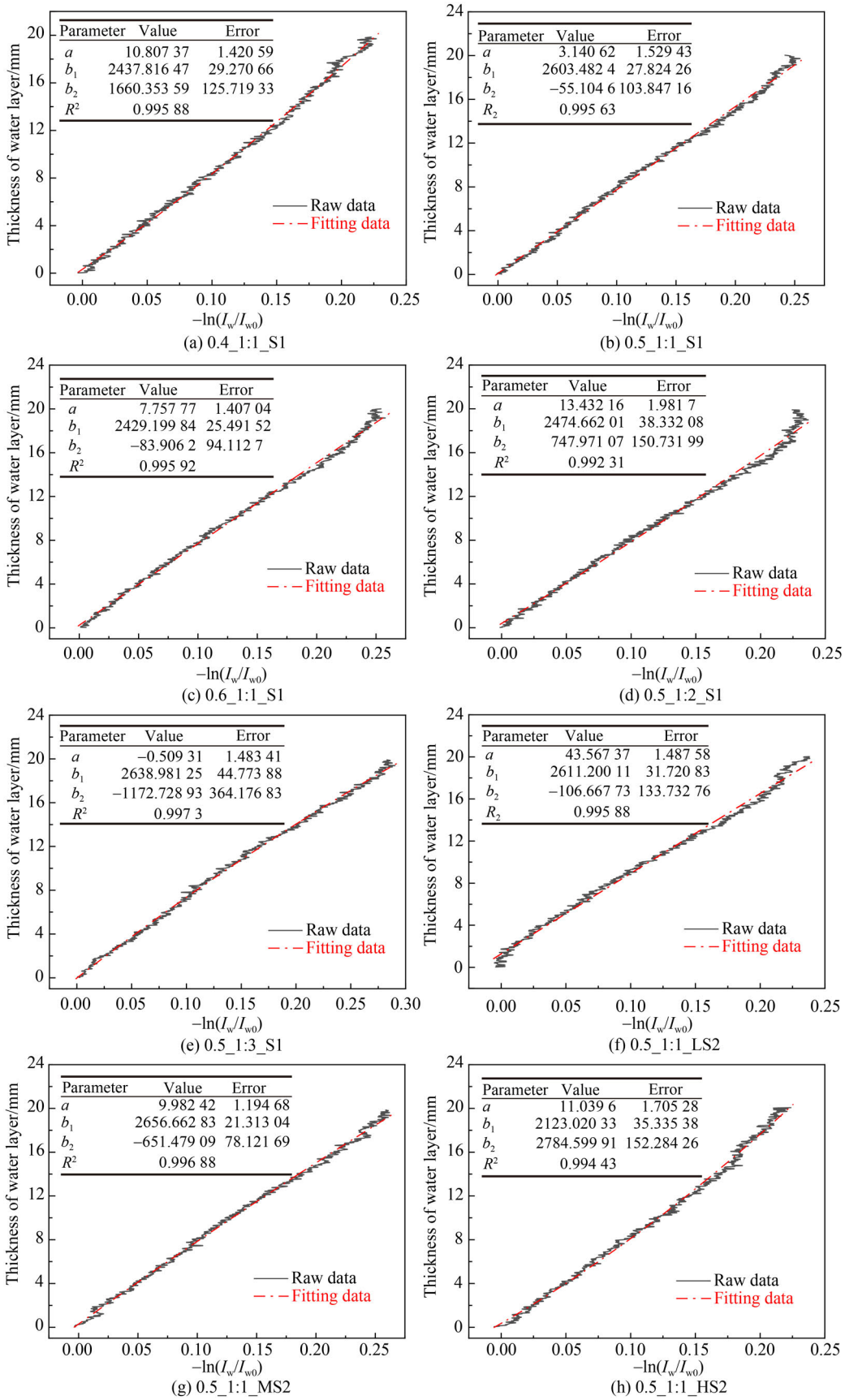
Fig. 6　Two-dimensional images before and after field nonuniformity correction

最后，得到校正后 2 种拍摄情况下 X 相片的每个像素差，以透射率差–ln(I_w/I_{w0})表示，并提取该结果，得到每个水层厚度下的平均值，并绘制出水层厚度与透射率差–ln(I_w/I_{w0})之间的关系，拟合的最终标定曲线如图 7 所示，该拟合曲线下决定系数(R^2)均大于 0.99。

在图 8 中，以水灰比为 0.5 的砂浆试样为例，展示了砂浆试样在吸水后通过 X 射线投影提取的水分分布过程，其中，吸水时间为 60 min。图 8a 为经过必要校正后的原始射线图像，该过程主要由吸水前后的 X 射线图像表示。图 8b 则是提取了经过校正的红色样本区域，计算得到吸水后图像的–ln(I_w/I_{w0})值，即展示的为水分的变化。图 8b 中的–ln(I_w/I_{w0})值可以在图 8c 所示的标定曲线上找到，并通过曲线的映射关系转换为水分厚度，最终换算为水分质量，如图 8d 所示，二维图像中的数据表示为单位面积上的水分质量，物理量单位为 g/mm^2。图 8e 则是根据图 8c 中的标定曲线计算了图 8d 中沿高度的水分梯度分布曲线，曲线中展示的结果为每个高度下–ln(I_w/I_{w0})的平均值对应的水分含量，表示为单位高度下的水分质量，物理量单位为 g/mm。

如图 9 所示，展示了不同砂浆试样在不同毛细吸水时刻的水分分布情况，并通过标定曲线实现了其中的水分标定。结果表明：在吸水过程中，样品底部开始吸水，形成了明显的水锋。当砂含量和砂粒径增大后，砂浆试样图像灰度的整体均匀性明显降低，且其吸水后水分分布的均匀性也受到了一定的影响，尤其体现在砂粒径较大的试样中。同时由于各砂浆试样中的成分以及孔隙率差异，导致各试样毛细吸水过程中的水分分布形状差异性较大。

随后，提取各试样在不同毛细吸水时刻的水分梯度，取每个高度下的平均值，即沿吸水高度方向上的水分分布情况，以一维结果表示，如图 10 所示，展示了不同时间点下不同样品的水分含量差异，其中纵轴表示特定高度处的水分含量值，横轴表示试样高度，水分含量为 0 时的横坐标表示为最终的水锋高度，曲线下的面积代表总水分含量。在吸水过程中，吸水质量以及吸水锋的高度随吸水时间逐渐增加，但增加趋势逐渐降低。随着水灰比的增加，砂浆试样



R^2 (determining coefficient) is the fitting degree of the model to the data, its value is between 0 and 1, and the closer it is to 1, the better the model fits; a, b_1, and b_2 are regression coefficients.

图 7 不同砂浆试样的标定曲线

Fig. 7 Calibration curves of different mortar samples

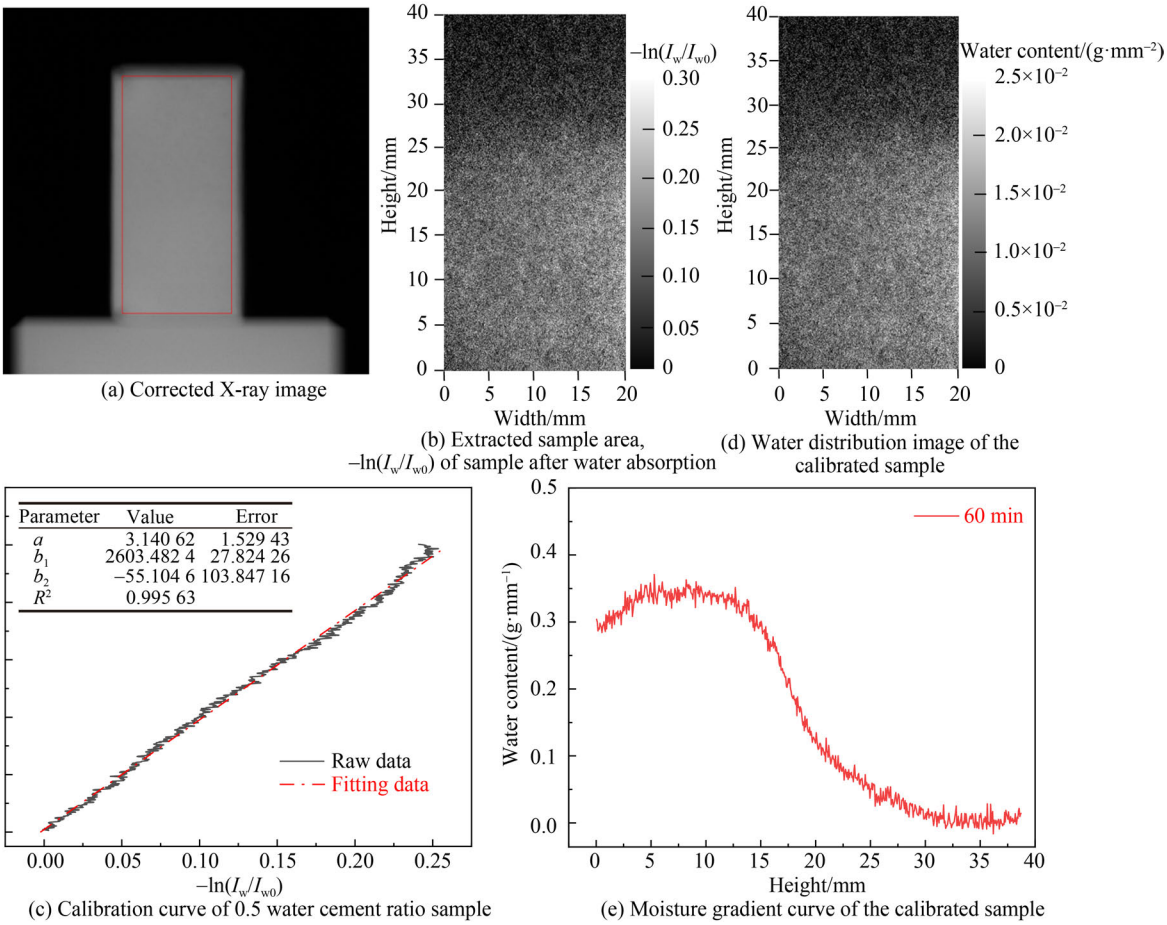
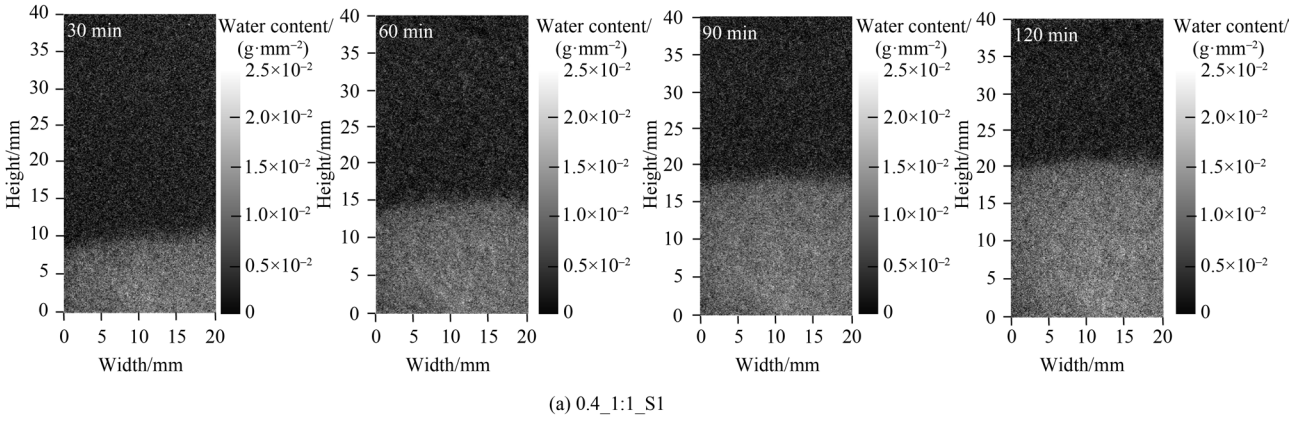
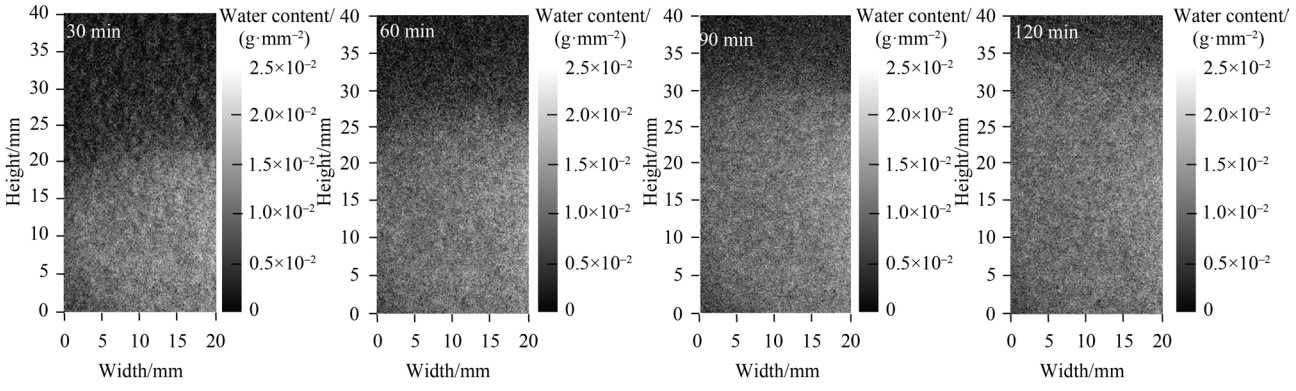


图 8　图像处理过程(以水灰比 0.5 的试样为例，吸水时间为 60 min)

Fig. 8　Image processing process (taking the sample with water-cement ratio of 0.5 as an example, the water absorption time is 60 min)



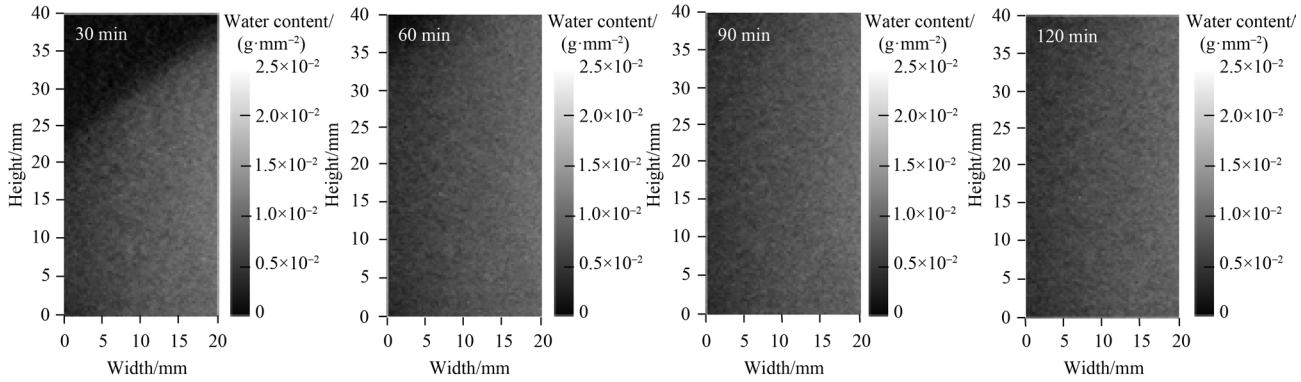
(a) 0.4_1:1_S1



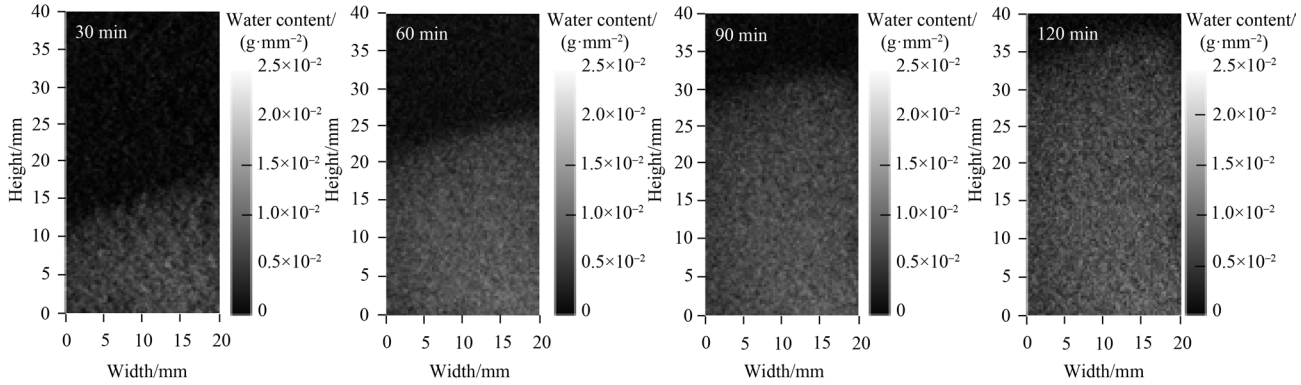
(b) 0.5_1:1_S1

To be continued

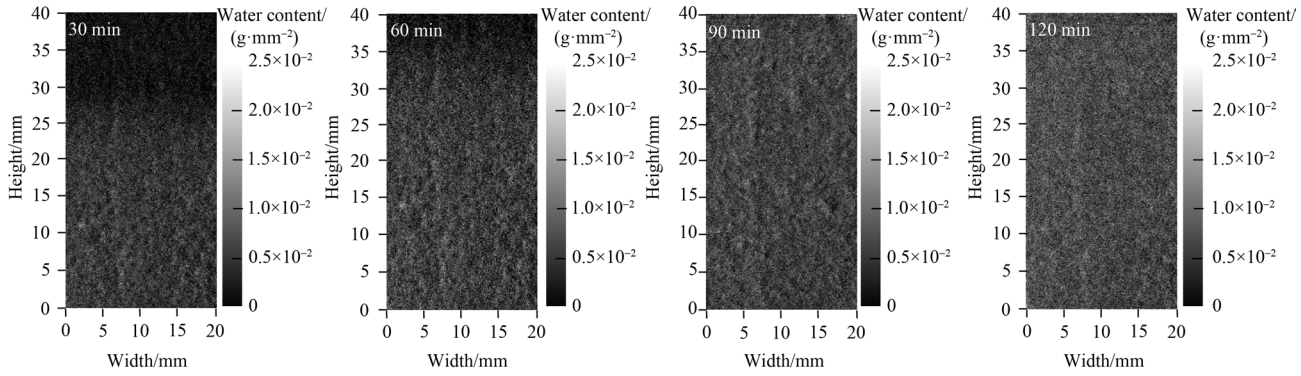
Continue to Fig. 9.



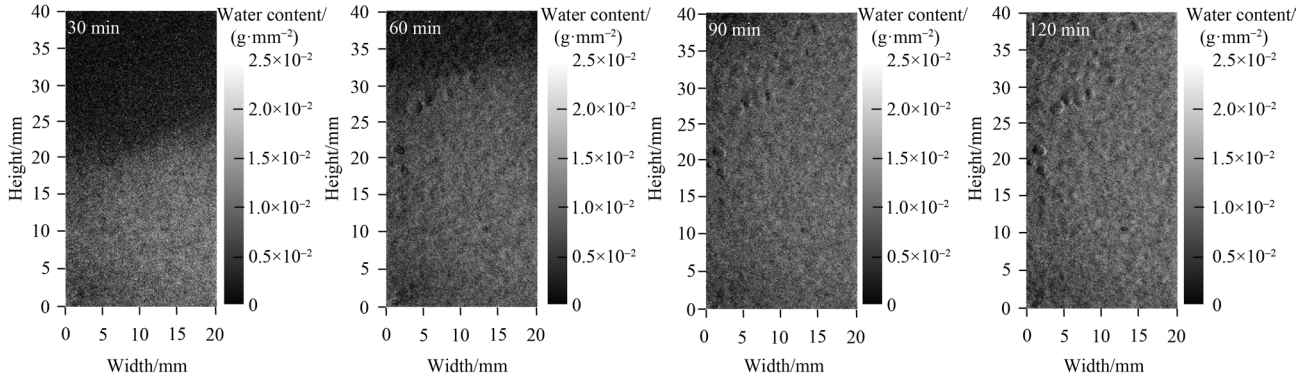
(c) 0.6_1:1_S1



(d) 0.5_1:2_S1



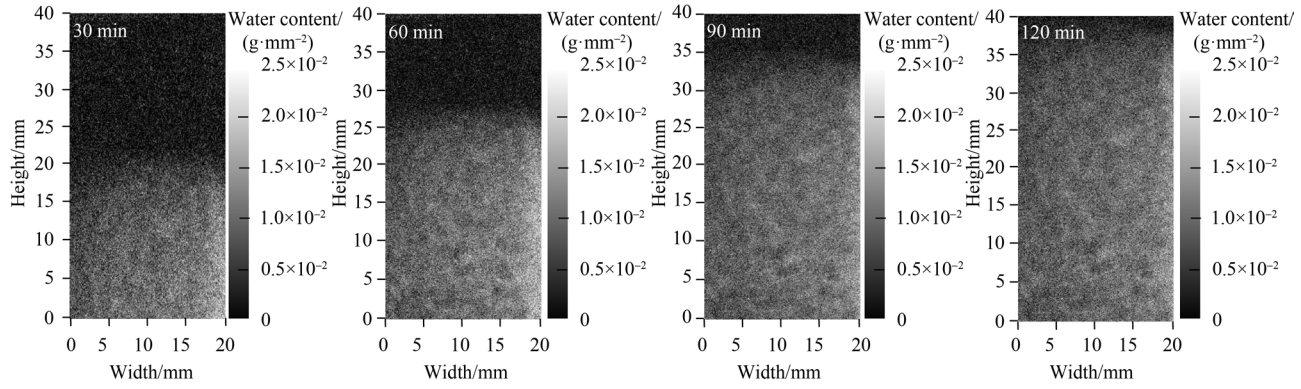
(e) 0.5_1:3_S1



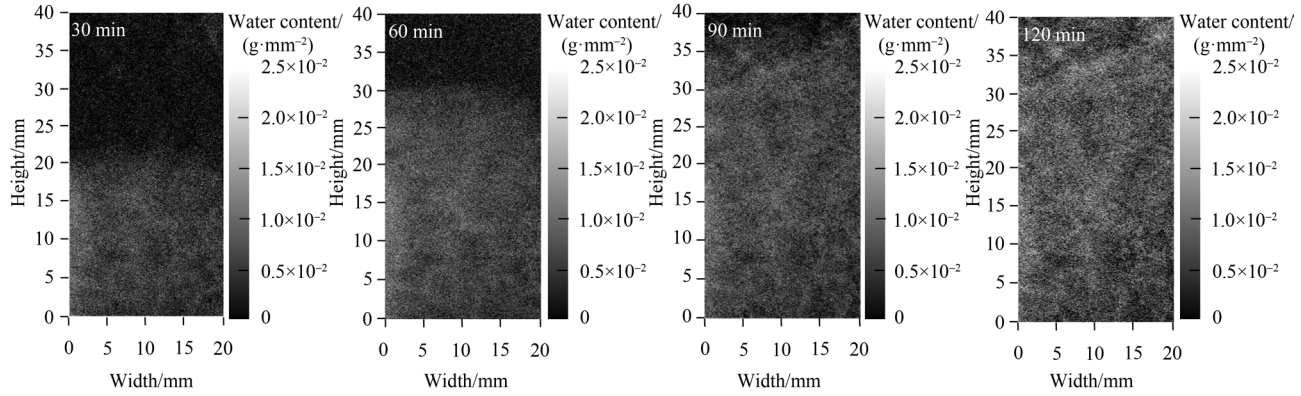
(f) 0.5_1:1_LS2

To be continued.

Continue to Fig. 9.



(g) 0.5_1:1_MS2



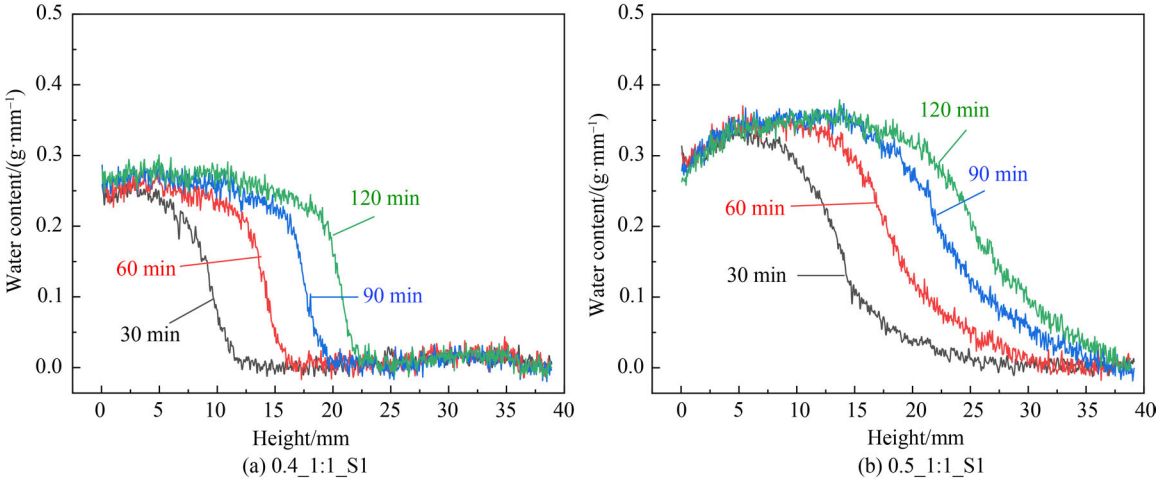
(h) 0.5_1:1_HS2

图 9　不同砂浆试样中的二维水分分布

Fig. 9　Two-dimensional moisture distribution in different mortar samples

的孔隙率逐渐增大，试样在相同吸水时间内吸水质量和水锋越高，如 0.4_1:1_S1、0.5_1:1_S1 和 0.6_1:1_S1 的图像所示。随着砂含量的增加，孔隙率和饱和吸水率越低，如表 2 所示的称重数据，但在相同的吸水时间下其水锋面推进的速度越快，如 0.5_1:1_S1、0.5_1:2_S1 和 0.5_1:3_S1 的图像所示。当水灰比和灰砂比相同时，不同砂粒径对于毛细吸水过程的影响规律并不明显。对于孔隙率较大的试样来说，如 0.6_1:1_S1、0.5_1:3_S1 和 0.5_1:1_LS2 的砂浆试样，当吸水时间过长导致毛细吸水趋于饱和时，吸水锋消失。

对于砂浆试样的总吸水量来说，通过称重法对其进行验证，验证结果如图 11 所示，并计算其与称重法的相对误差与绝对误差。结果表明，该标定方法与称重法的最大相对误差为 4.8%，最大绝对误差为 0.48 g，表明该方法在不同砂浆试样中的准确性。



(a) 0.4_1:1_S1　　(b) 0.5_1:1_S1

To be continued.

Continue to Fig. 10.

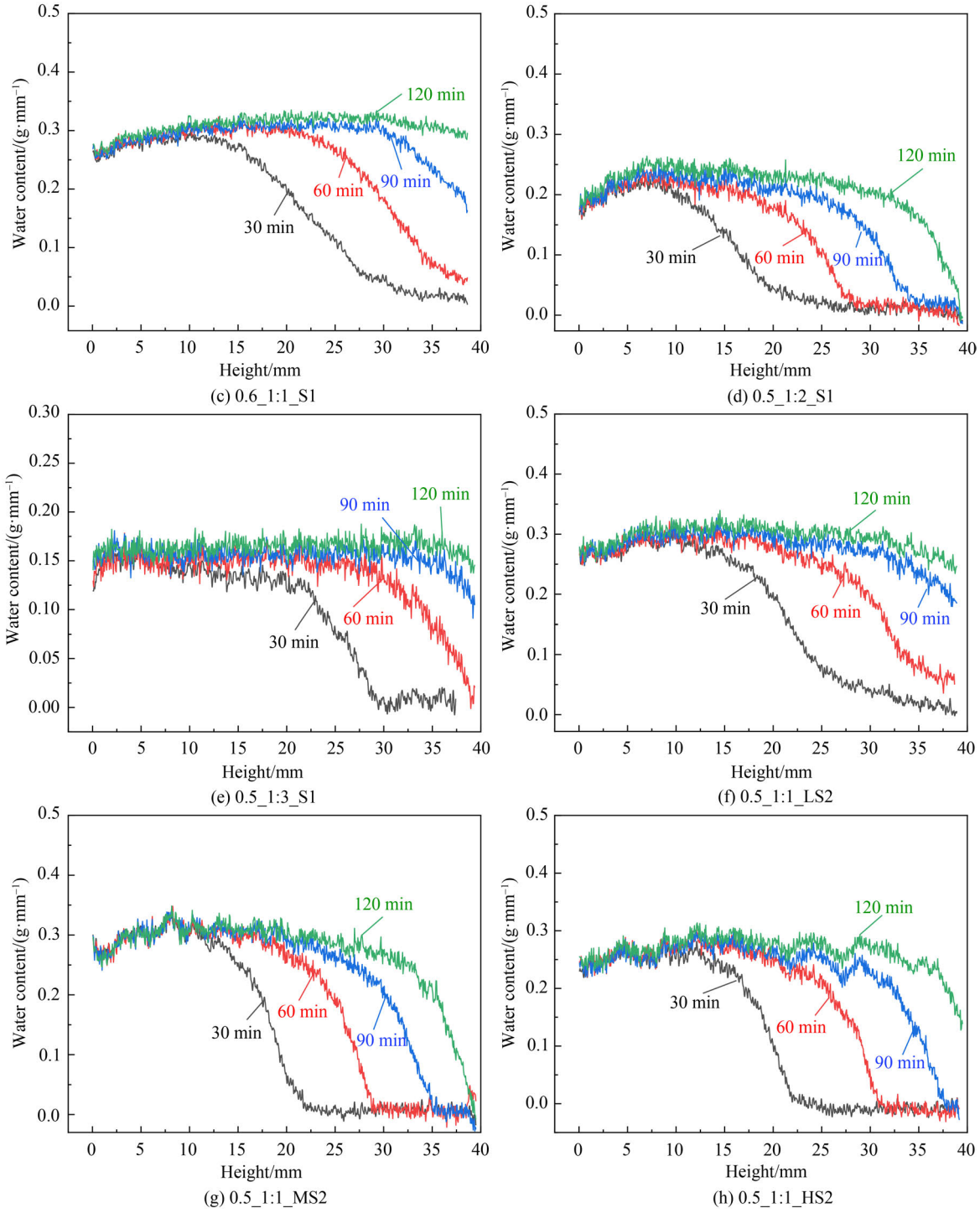


图 10 不同砂浆试样的水分梯度分布

Fig. 10 Moisture gradient distribution of different mortar samples

4 结论

本工作提出一种新的用于水泥砂浆的定量方法，该方法通过单一校准过程，能够量化不同水灰比、胶砂比、砂粒径等样品中的水分含量。根据本工作的理论和实验结果，可以得出以下结论：

1) 该方法通过建立已知含水量与 X 射线之间的非线性衰减关系，解决了大尺寸砂浆试样引起的 X 射线非线性衰减问题，实现了水分含量的精确测量，与称重法相比，所有样品在吸水过程中的相对误差均不超过 4.8%。

2) 水灰比、胶砂比和砂粒径对砂浆的毛细吸水过程影响较大，具体表现在吸水的均匀性、水面锋的形状、水面锋的推进高度和推进速度，这主要与

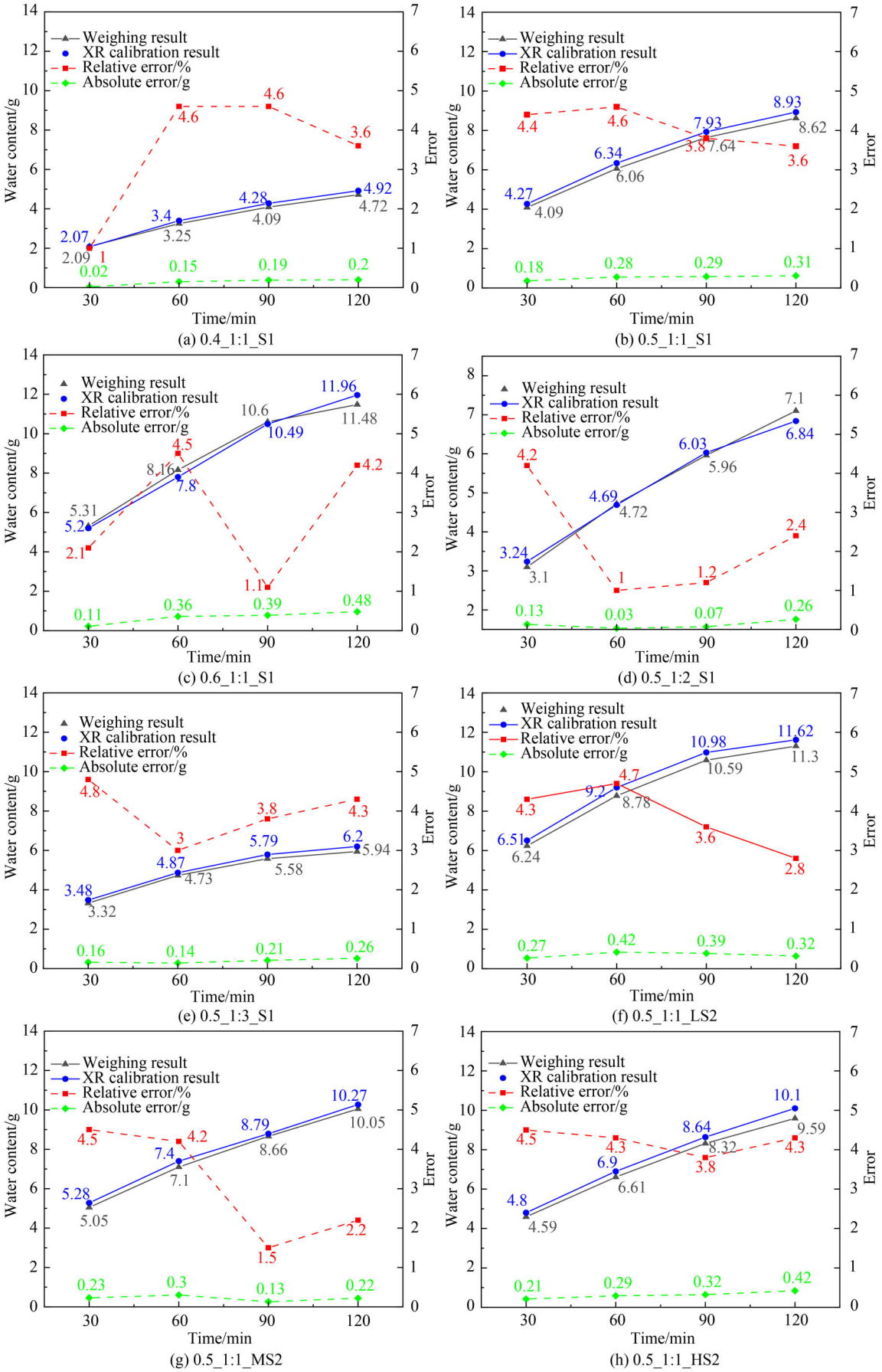


图 11　不同砂浆试样的总含水量标定结果

Fig. 11　Calibration results of total water content of different mortar samples

各试样的孔隙差异有关。

3) 该方法能准确的实时追踪砂浆中的水分传输，能够实现不同砂浆试样中水分传输的一维和二维分布演变的可视化定量，相对于称重法更能准确的得到水泥基材料中的水分传输规律。

参考文献:

[1] HONG S X, YAO W Q, GUO B W, et al. Water distribution characteristics in cement paste with capillary absorption[J]. Constr Build Mater, 2020, 240: 117767.

[2] 冯乃谦, 邢锋. 混凝土与混凝土结构的耐久性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[3] 喻建伟, 张朝阳, 孔祥明, 等. 内掺硅烷乳液憎水剂对混凝土性能的影响[J]. 2021(2): 372–380.
YU Jianwei, ZHANG Chaoyang, KONG Xiangming, et al. J Chin Ceram Soc, 2021(2): 372–380.

[4] 卢艺菲, 王捷, 梁华明, 等. 矿物掺合料对水泥砂浆毛细吸收性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(5): 1110–1120.
LU Yifei, WANG Jie, LIANG Huaming, et al. J Chin Ceram Soc, 2025, 53(5): 1110–1120.

[5] ZHOU C S, ZHANG X Y, WANG Z D, et al. Water sensitivity of cement-based materials[J]. J Am Ceram Soc, 2021, 104(9): 4279–4296.

[6] ZHUTOVSKY S, DOUGLAS HOOTON R. Role of sample conditioning in water absorption tests[J]. Constr Build Mater, 2019, 215: 918–924.

[7] MARKS B, MILETIĆ M, LEE B C H, et al. Monitoring steel fibre orientation in self-compacting cementitious composite slabs during pouring with dynamic X-ray radiography[J]. Cem Concr Res, 2021, 143: 106390.

[8] ROELS S, CARMELIET J. Analysis of moisture flow in porous materials using microfocus X-ray radiography[J]. Int J Heat Mass Transf, 2006, 49(25–26): 4762–4772.

[9] 郑帆. 基于 X 射线投影成像的水泥基材料水传输量化表征[D]. 深圳: 深圳大学, 2022.
ZHENG Fan. Quantitative characterization of water transport of cement-based materials based on X-ray projection imaging[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2022.

[10] BAKER P H, BAILLY D, CAMPBELL M, et al. The application of X-ray absorption to building moisture transport studies[J]. Measurement, 2007, 40(9–10): 951–959.

[11] VOSS A, POUR-GHAZ M, VAUHKONEN M, et al. Electrical capacitance tomography to monitor unsaturated moisture ingress in cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2016, 89: 158–167.

[12] MESBAH H, LOTFI H, BANOUNI H, et al. An ultrasonic device for investigating the impacts of water content on cement durability by measuring dispersion curves[J]. Acoust Phys, 2023, 69(4): 582–587.

[13] JARNY S, ROUSSEL N, RODTS S, et al. Rheological behavior of cement pastes from MRI velocimetry[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(10): 1873–1881.

[14] MATSUNAGA N, YANO K, ENDRIZZI M, et al. Detection of individual sub-pixel features in edge-illumination X-ray phase contrast imaging by means of the dark-field channel[J]. J Phys D: Appl Phys, 2020, 53(9): 095401.

[15] XU K, TREMSIN A S, LI J Q, et al. Microstructure and water absorption of ancient concrete from Pompeii: An integrated synchrotron microtomography and neutron radiography characterization[J]. Cem Concr Res, 2021, 139: 106282.

[16] BENTZ D P, HANSEN K K. Preliminary observations of water movement in cement pastes during curing using X-ray absorption[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(7): 1157–1168.

[17] BENTZ D P, HANSEN K K, MADSEN H D, et al. Drying/hydration in cement pastes during curing[J]. Mater Struct, 2001, 34(9): 557–565.

[18] LUKOVIC M, YE G, SCHLANGEN E, et al. Moisture movement in cement-based repair systems monitored by X-ray absorption[J]. Heron, 2017, 62(1): 21–45.

[19] ZHENG F, HONG S X, HOU D S, et al. Rapid visualization and quantification of water penetration into cement paste through cracks with X-ray imaging[J]. Cem Concr Compos, 2022, 125: 104293.

[20] ZHENG F, DONG B Q, HONG S X, et al. A 2D rapid quantitative method for wetting and drying process in cementitious materials based on X-ray radiography[J]. Measurement, 2024, 237: 115122.

[21] 杨柳, 宋勇, 李廷, 等. 基于蒙卡模拟能谱划分的 X 射线图像硬化校正方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2024, 41(9): 1145–1151.
YANG Liu, SONG Yong, LI Ting, et al. Chin J Med Phys, 2024, 41(9): 1145–1151.

[22] 陈浩, 陈云斌, 李寿涛. 局部扫描情况下多项式拟合的 X 射线硬化校正[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(11): 114001.
CHEN Hao, CHEN Yunbin, LI Shoutao. High Power Laser Part Beams, 2015, 27(11): 114001.

[23] WANG X, DONG B Q, FENG X, et al. Beam-hardening correction method for quantifying moisture content in cement paste based on X-ray radiography[J]. Constr Build Mater, 2024, 421: 135742.

[24] SANT G, WEISS J. Using X-ray absorption to assess moisture movement in cement-based materials[J]. J ASTM Int, 2009, 6(9): 1–15.

[25] MCCULLOUGH E C. Photon attenuation in computed tomography[J]. Med Phys, 1975, 2(6): 307–320.

[26] OESCH T, WEISE F, MEINEL D, et al. Quantitative *in situ* analysis of water transport in concrete completed using X-ray computed tomography[J]. Transp Porous Medium, 2019, 127(2): 371–389.

[27] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. GB 175—2023 通用硅酸盐水泥[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[28] SIEDBAND, M. P . Beam filtration in diagnostic radiology[J]. ASTM STP, 1980, 716(354): 156–167.

[29] GAUNTT D M, BARNES G T. X-ray tube potential, filtration, and detector considerations in dual-energy chest radiography[J]. Med Phys, 1994, 21(2): 203–218.

[30] DO NASCIMENTO M Z, FRÈRE A F, GERMANO F. An automatic correction method for the heel effect in digitized mammography images[J]. J Digit Imaging, 2008, 21(2): 177–187.

[31] NAZEMI E, MOVAFEGHI A, ROKROK B, et al. A novel method for predicting pixel value distribution non-uniformity due to heel effect of X-ray tube in industrial digital radiography using artificial neural network[J]. J Nondestruct Eval, 2018, 38(1): 3.

Visual Quantitative Characterization on Moisture Transmission in Mortar Based on X-ray Radiography

HUANG Xiaoming[1], *GAO Weibo*[1], *ZHOU Longyan*[2], *WANG Xu*[1], *CHEN Jinyu*[1], *DONG Biqin*[1], *HONG Shuxian*[1]
(1. College of Civil and Transportation Engineering Shenzhen University; Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Shenzhen 518000, Guangdong, China; 2. Shenzhen Deepwater Buji Water Purification Co., Ltd, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Extended Abstract

Introduction The transport process of moisture in concrete is a physical phenomenon and a medium for the transmission of many harmful substances, having a far-reaching impact on the durability and structural safety of concrete. Moisture flows through pores and cracks in concrete that can provide penetration channels for harmful substances such as chloride ions, sulfate ions and carbon dioxide. Especially in humid environments, moisture promotes the migration of these harmful substances and accelerates the chemical processes such as chloride corrosion caused by chloride ions, thus significantly reducing the durability of concrete. The quantitative study of moisture transport can reveal the migration patterns of moisture in concrete, and identify/quantify various durability problems caused by moisture, providing a theoretical support for the maintenance, repair and life prediction of concrete structures.

Methods In this study, the quantitative principle of moisture transport in mortar was derived based on Beer's law theory, and a triangular prism moisture layer sample mold was designed and conceptualized. Water could be directly infused into the prism, and in the process of X-ray transmission, a superposition model of dry mortar and water layer was formed. The relationship between known water content and X-ray transmittance was obtained by this calibration model, and then the calibration was performed through the change of X-ray transmittance of mortar sample before and after water absorption.

According to the standard GB 175—2007, China, mortar samples with the dimensions of 40 mm×20 mm×60 mm (h×b×d) were prepared with water, sand, and P·O·42.5 ordinary cement. The samples were the samples with different water-cement ratios of 0.4, 0.5, and 0.6 (W/C) (at a cement-to-sand ratio of 1:1), the mortar samples with different cement-sand ratios of 1:1, 1:2, and 1:3 (C/S) (at a water-cement ratio of 0.5), and the mortar samples with different sand particle sizes of 0.5–1.5 mm, 1.5–3.0 mm, and 3–5 mm (at a water-cement ratio of 0.5 and cement-sand ratio of 1:1), totaling 8 groups. Prior to the capillary water absorption test, the calibration model for each sample was measured by X-ray projection, and the X-ray radiography error was corrected for field inhomogeneity. A water calibration curve was then obtained, showing a relationship between X-ray transmittance ($-\ln(I_w/I_{w0})$) and moisture thickness, ranging from 0 to the maximum thickness d. Subsequently, a capillary water absorption experiment was conducted. After the absorption experiment, X-ray radiography and weighing were performed to obtain the X-ray transmittance ($-\ln(I_w/I_{w0})$) at different water absorption stages, with field inhomogeneity correction and normalization applied. Finally, the mass after water absorption was calibrated *via* the calibration curve and verified by the weighing results.

Results and discussion The relationship curve between water thickness and X-ray transmittance in mortar samples is obtained, having the fitting results (R^2>0.99). During water absorption, the bottom of the sample begins to absorb water, forming a distinct water peak, indicating a one-dimensional water absorption process. As water absorption progresses, the water front gradually moves upward. However, the water distribution during capillary water absorption varies significantly due to the differences in composition and porosity among the mortar samples. The height of the water absorption front increases with time, though the rate of increase gradually slows. The water absorption front disappears when capillary water absorption approaches a saturation after a prolonged absorption period. For the total water absorption of each mortar, the maximum relative error between the calibration and weighing results is 4.8%.

Conclusions A quantitative method for cement mortar was proposed. This method could allow for the quantification of moisture content in samples with different water-cement ratios, cement-sand ratios, and sand particle sizes through a single calibration process. The method could reduce both cost and time *via* eliminating a need to prepare different calibration samples. The method could accurately track a moisture transmission in mortar in real-time, capture the distribution and evolution of moisture in various mortars, and enable local quantification of moisture content in different regions of the samples. The experimental results showed that the smaller the C/S and sand particle size was, the better the water absorption uniformity would be. The seepage velocity and height of water surface peak increased with the increase of W/C and C/S. This method could obtain a reliable calibration for different mortar samples. Compared to the weighing method, the maximum relative error of all the samples during the water absorption process by this method could be less than 4.8%.

Keywords X-ray imaging; mortar; moisture transport; calibration method