

基于气体传输量和压力梯度的微裂纹定量表征方法

杨 进^{1,2}, 邱金胤¹, 陈 伟¹, 苏 英^{1,2}, 贺行洋^{1,2}, 张 强³

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 武汉 430068; 2. 湖北省建筑防水工程技术研究中心, 武汉 430068; 3. 中国建筑第三工程局有限公司, 武汉 430070)

摘 要: 水泥基材料因脆性、体积收缩等特性, 易在内部形成微裂纹, 从而影响材料强度及耐久性。本工作探讨了一种基于气体在微裂纹中的一维输运和试样两端的压力梯度来表征微裂纹体积等效宽度的方法, 并用于评价水泥基材料裂纹自愈合过程演变及愈合效率。为了更好验证测试结果的准确性, 采用预设裂纹宽度分别为 0.03、0.05、0.10、0.15 mm 和 0.20 mm。实验表明: 该方法可在短时间内(400 s)准确量化 0.15 mm 以下的微裂纹, 且在 20~50 mL/min 的气体流量下, 误差不足 10%。验证表明, 所建立的基于气体传输的微裂纹测试方法具有较高的准确性和良好的可靠性。该方法同样适用于水泥基材料的自愈合评价, 可快速量化愈合后的裂纹等效宽度和愈合率。

关键词: 水泥基材料; 微裂纹; 气体传输; 自愈合

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)05-1144-11

网络出版时间: 2025-01-10



水泥基复合材料由于其较低的成本及良好的力学性能, 在建筑领域得到了广泛的应用。然而, 在水硬化及服役过程中, 此类材料常遭受塑性收缩、自收缩、干燥收缩、冻融循环及外部荷载等多重作用^[1-5], 进而诱发内部微裂纹的形成。水泥基材料内部微裂纹的萌生与发展, 易成为硫酸盐、氯盐等侵蚀介质的渗透通道, 对结构的稳定性、耐久性及安全性构成了不利影响^[6-7]。因此, 水泥基材料内部裂纹的表征与评价得到国内外学者的广泛关注。

目前, 水泥基材料的裂纹测量常采用图像观测及分析方法, 通过现有的仪器设备对图像形式的数据进行处理, 分析和计算裂缝状态、宽度、愈合率。在水泥基材料微裂纹表征方面, 扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)^[8-9]已被广泛用于直接观察水泥基材料的微观结构, 以辅助评价裂纹的分布和开裂情况^[10-11], 但难以对微裂纹进行快速精确的量化; 压汞(MIP)等孔结构测试方法可用于测定材料内部孔隙、裂纹等缺陷的整体情况^[12], 但难以实现对裂纹的针对性表征。在宏观裂纹测试方面, 常采用超声、光学显微镜等方法^[13-14]。Zhou 等^[15]

通过光学显微镜对裂纹进行观测, 以量化其粗糙度、长度和连通性。此外, 利用图像分割等处理方法, 可以将图像中的像素数量转换为裂纹的实际尺寸^[16]。尽管如此, 这些方法在快速且精确地测量样品内部微裂纹宽度方面仍面临一定挑战。在渗透与扩散传输方法方面, 气体渗透、氯离子扩散、气体扩散等方法常被用于表征水泥基材料的传输性能。例如, 桂强等^[17]提出了基于液体渗透原理的定量分析方法, 以评估水泥基材料中的裂纹状况。液体渗透法多采用水、酒精等作为渗透介质, 但酒精的高挥发性在一定程度上限制了其作为渗透介质的应用效果。此外, 未水化水泥颗粒的存在、毛细结构的变化以及其他因素可能导致水泥的重新水化, 从而影响渗透过程的稳定性, 进而干扰裂纹的准确评估^[18]。周春圣等^[19]通过相互作用直推法(IDD 理论)框架对裂纹密度与整体渗透率的关系进行了统一描述。Lee 等^[20]报道了一种基于气体扩散速率的测量方法, 用于定量表征水泥基材料中的裂纹宽度。该方法通过测量达到样品两端气体浓度平衡所需的时间, 进而计算裂纹宽度。然而, 气体扩散测试也面

收稿日期: 2024-09-23。 修订日期: 2024-12-30。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52172017); 国家自然科学基金青年项目(51902095)。

第一作者: 杨 进(1989—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 贺行洋(1976—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-09-23. Revised date: 2024-12-30.

First author: YANG Jin (1989—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: jinyang@hbut.edu.cn

Correspondent author: HE Xingyang (1976—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: hexycn@163.com

临诸多挑战, 包括气体浓度的不稳定性、气体扩散速度的缓慢, 以及测试样品成分对测试结果的影响等, 这些因素均可能降低测试结果的准确性^[21]。

基于此, 本工作探索了一种基于惰性气体氩气定向传输的微裂纹测试方法, 通过综合考量样本尺寸及两端的压力梯度, 分析气体在裂纹及水泥基体中的传输行为, 能够快速准确测定微裂纹宽度。在测试过程中, 气体源向封闭区域释放气体, 气体在材料微观结构中的流动优先通过尺寸较大的裂纹^[22]。因此, 可有效排除气体通过水泥基体传输的可能性, 减少气体传输对裂纹以外区域的影响。在测试过程中, 仅考虑通过裂纹的气体体积, 从而提高了测量的准确性。

以微裂纹为主要研究对象, 通过调节不同进气流量, 对 0.03~0.20 mm 宽度范围内的裂纹进行了测量, 并根据 Darcy 定律利用压力梯度、样品尺寸及气体黏度系数计算出裂纹等效宽度。同时, 将气体传输法得到的测量结果与光学显微镜的观测结果进行了对比, 验证了该方法在微裂纹宽度测量中的准确性和可靠性。此外, 还将气体传输方法应用于水泥基材料的裂纹自愈合表征, 以评价裂纹愈合过程中的等效宽度演变及自愈合效率。

1 实验

1.1 样品制备

制备的水泥基材料样品所用水泥为 P·O 42.5, 水胶比为 0.3 (质量分数), 所用聚羧酸高效减水剂 (PCE) 固含为 40%。为了更好验证测试结果的准确性, 采用插片法预设具有特定裂纹宽度的水泥净浆开裂样品, 预设裂纹宽度为 0.03、0.05、0.10、

0.15 mm 和 0.2 mm。采用直径为 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱体模具, 通过插片法, 预先在模具中心放置不同厚度的钢片^[23], 以控制形成不同标准宽度的贯穿裂纹。在模具中浇筑水泥浆体后, 样品在常温常压下进行固化, 48 h 后移除模具, 随后放置在标准养护室内继续养护 28 d。

1.2 气体传输动态测试系统

使用的气体传输系统主要由样品室、气体传输控制系统和计算机数据采集系统组成, 如图 1 所示。气体传输系统的组成部分包括导管、气体质量流量计、压力表、进口阀、出口阀、气体储罐和气瓶。渗透介质采用惰性气体—氩气, 以避免与水泥基材料之间的潜在作用。计算机数据采集系统能够记录气体传输过程中相对压力与温度、气体流量的实时变化。多功能气体质量流量计主要通过调节进口端流量来调节气体传输设备, 以达到稳定流动状态。测试采用了 EL-FLOW Prestige 气体质量流量计, 能够维持 0~50 mL/min 的气体流量, 位于气体质量流量计后端的压力指示器量程为 0~20 bar (1 bar=10⁵ Pa), 用于测量试样两端的相对压力差。

在测试过程中, 样品需置于封闭的样品台上, 并通过热塑管包裹顶部通风口底座、样品和基座, 且下部底座带有进气管, 顶部通风口带有出气管。套上舱室罩后, 样品室内维持油浴环境以确保密封性。测试温度保持在 25 ℃ 左右。连接设备并放置样品后, 将气体质量流量计设置为 0 mL/min。随后打开进出口阀门, 启动数字压力表以校准压力差。此时无气流通过, 压力表读数应校准为 0。接着调整气体质量控制器至所需流量, 使气体通过设备并记录不同流量下的压力梯度变化。

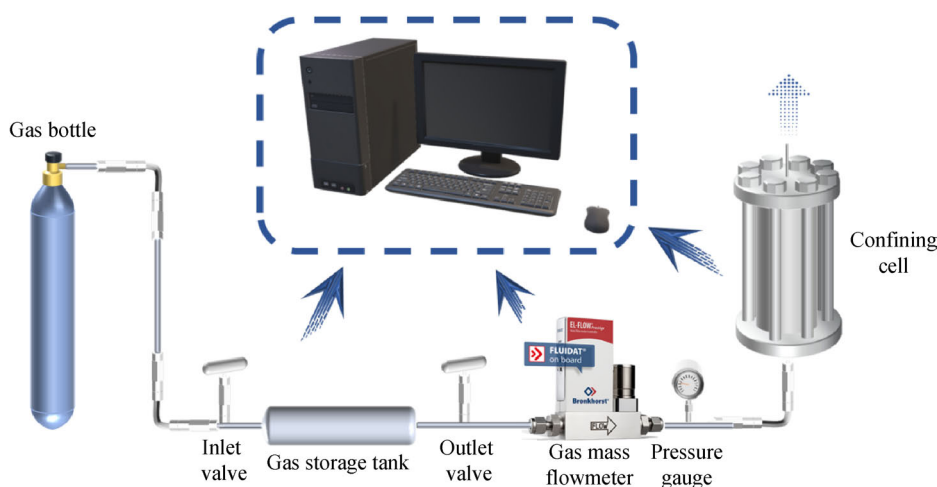


图 1 气体传输测试系统示意图

Fig. 1 Developed gas transport testing system

1.3 裂纹等效宽度计算方法

在材料气体传输或渗透性测试中,测得的压力差值仅能间接反映裂纹的大小。压力差与裂纹宽度之间存在反比关系,但这一信息不足以准确描述裂纹的具体宽度。Darcy 定律是描述流体通过多孔介质渗透性的经典定律之一,具有广泛的应用。Darcy 定律可以用于描述宏观尺度上孔隙中的流体传输:

$$q = -\frac{k}{\mu} \Delta P \quad (1)$$

在此假设中,当忽略流体自身影响时^[24], k 是固体多孔体孔隙度的本征渗透率函数(与流体性质无关),而 μ 是流体的动态黏度。分数 $K=k/\mu$ 表示材料的传导性, ΔP 是样品内部的压力梯度。Darcy 定律还可以表达为如下形式:

$$Q = -k \frac{A}{\mu} \Delta P \quad (2)$$

在未发生断裂的多孔介质孔隙中,流体主要发生微观尺度传输,Darcy 定律很好地描述了这一过程。当材料内部产生裂纹时,通过裂纹的层流状态可采用由平行板概念所发展出的立方定律来表述^[25–26]。在立方定律中,流量与裂纹宽度的 3 次方成正比,这可以更准确地反映出裂纹对流体渗透性的影响,具体表示为:

$$Q = -\frac{l\omega^3}{12\mu} \Delta P (\omega \ll l) \quad (3)$$

与 Darcy 定律类似的立方定律(式(2))得出了本征渗透率 $k=\omega^2/12$ 。 ω 为裂纹宽度, l 为圆柱体试样直径。

根据采用的模型,如果在断裂面上考虑 2 个标准正交向量 e_x 和 e_y ,以及该平面的外单位向量 e_z ,则流体流动的控制方程为:

$$\begin{aligned} Q \cdot e_x &= \frac{l\omega^3}{12\mu} \Delta P \cdot e_x \\ Q \cdot e_y &= \frac{l\omega^3}{12\mu} \Delta P \cdot e_y \\ Q \cdot e_z &= \frac{l\omega^3}{12\mu} \Delta P \cdot e_z \end{aligned} \quad (4)$$

本工作的水泥基材料裂纹是贯通性微裂纹,与水泥基体相比,气体将优先通过大尺寸微裂纹,因此不考虑气体在 y 轴和 z 轴上的扩散。则公式可简化为:

$$\begin{aligned} Q \cdot e_x &= \frac{l\omega^3}{12\mu} \Delta P \cdot e_x \\ Q \cdot e_y &= 0 \\ Q \cdot e_z &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

1.4 光学显微镜测试方法

为验证气体传输测试结果的可靠性,对二者进行了对比验证,采用的光学显微镜为 ZEISS Axiolab 5 智能显微镜,其能够高精度、高分辨率地检测微小裂纹的宽度。采用等距采样方法,从样品表面顶部到底部划分了 5 个测试区域,每个区域从上到下设置了 20 个测试点,每个样品共计 100 个测试点,如图 2 所示。

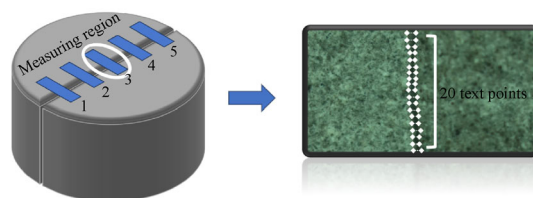


图 2 光学显微镜测试试样及表面裂纹测试点示意图
Fig. 2 Optical microscope test sample and surface crack test point schematic diagram

1.5 基于气体传输的裂纹自愈合测试方法

为了探讨气体渗透法对水泥基材料裂纹自愈合表征的适用性,制备了添加 1%(质量分数)AA-AM 共聚 SAP 的水泥净浆样品,样品参数与 1.1 节保持一致,并设置裂纹宽度为 0.1 mm。在进行气体传输测试前,自愈合水泥基材料在 100%相对湿度(RH)下保持 24 h,使裂纹处的 SAP 颗粒发生溶胀^[27],从而形成封堵效应。愈合指数通常用于评估裂纹的密封程度^[28],其公式为 $x=s_1/s_0$ (s_0 为试样愈合前的气体渗透率, s_1 为试样愈合后的气体渗透率),但是其是一个相对概念,直接将其与裂纹宽度进行直观关联存在困难^[29]。本工作提出了一种等效裂纹宽度的概念,作为绝对愈合的有效指标,以弥补这一不足。愈合率计算公式为:

$$R = (\omega_0 - \omega_1) / \omega_0 \quad (6)$$

式中: R 为裂纹愈合率; ω_0 为初始裂纹宽度; ω_1 为愈合后的裂纹等效宽度。

2 结果与讨论

2.1 传输时间对气体传输的影响

图 3 为裂纹宽度与样品两端压力差随时间变化的关系。由图 3 可见,裂纹宽度在 0.03~0.15 mm 时,气体在样品裂纹中迅速达到稳定流动状态,并且在气体流量在 10~50 mL/min,相对压力差保持恒定。由于较长的测试时间可能导致气流稳定性下降、相对压力差减小等负面影响^[30],为确保实验数据的准确性,选择前 600 s 的入口压力做进一步分析。

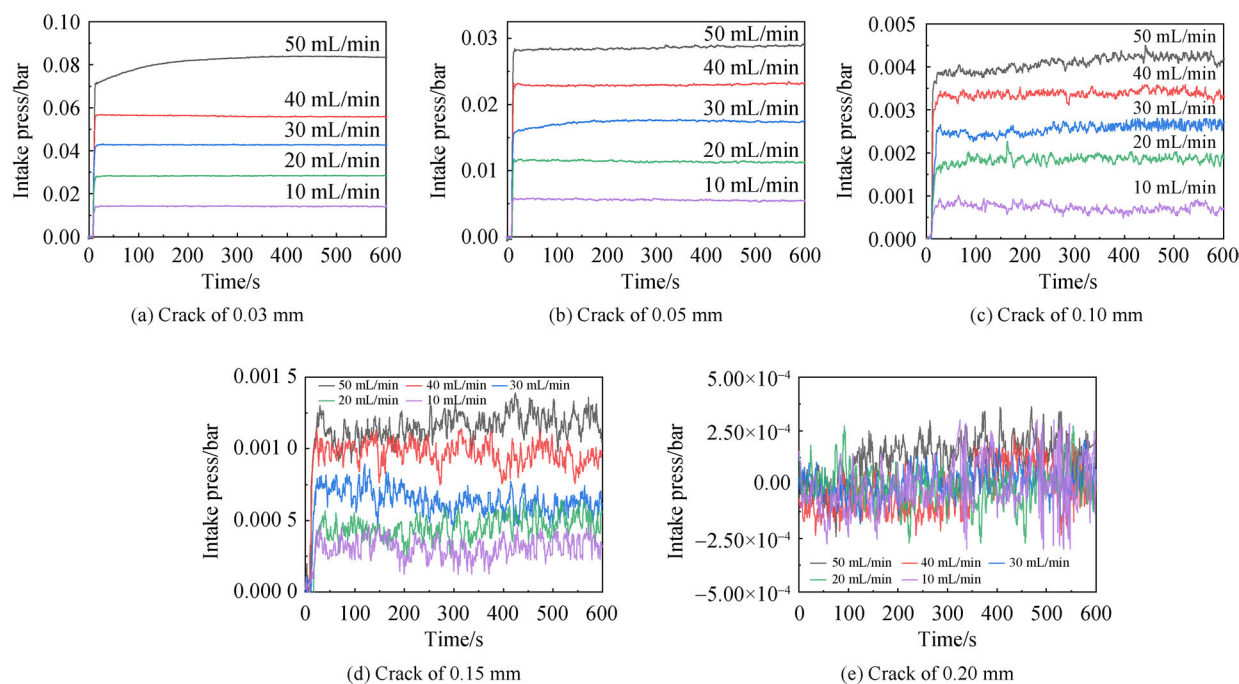


图 3 气体通过不同宽度裂纹(0.03~0.20 mm)的压力梯度变化
Fig. 3 Pressure difference of gas through different crack widths (0.03–0.20 mm)

由图 3 可见, 氩气在微裂纹中传输 400 s 时, 压力均已处于稳定状态。因此, 本工作统一选择 400 s 稳定压力, 根据式(5)进行裂纹宽度计算, 结果如图 4 所示。在实际应用中, 尤其是对于大尺度系统或均匀变化的情况, 常假设压力沿着某一方向发生线性变化。在此假设下, 实际压力梯度 ΔP 由 P/l 表示, 其中 P 代表样品两端的压力差, l 代表样品的实际长度。这有助于明确每单位长度的压力变化, 便于更全面地分析裂纹宽度的测量结果。该压力梯度是一个重要的实验参数, 对于确定裂纹宽度至关重要。由图 4 可见, 随着裂纹宽度的增加, 气体传输计算得到的裂纹宽度波动幅度也相应增加。当裂纹宽度在 0.03~0.15 mm 范围时, 气体传输法可以较为平稳的测出其宽度值。然而, 当裂纹宽度为 0.2 mm 时, 压力差可忽略不计, 难以准确测出裂纹宽度。

2.2 裂纹宽度对气体传输的影响

根据图 4 中裂纹宽度的实时测定结果统计计算得到的平均裂纹宽度及误差如图 5 所示。在图 5a 中, 将 10~50 mL/min 的结果取平均值计算得到的综合平均宽度。结果表明, 预设裂纹宽度为 0.03 mm 时, 气体传输测得的综合裂纹宽度与平均裂纹宽度分别为 0.039 7 mm 与 0.038 0~0.040 3 mm, 其误差分别为 32.44%与 26.67%~34.33%。当预设裂纹宽度为 0.05、0.10 mm 和 0.15 mm 时, 气体传输测得的平均裂纹宽度分别为 0.054 4、0.103 5 mm 和

0.156 9 mm, 误差率分别为 8.76%、3.46%和 4.59%。需要注意的是, 较小的预设裂纹引起了较大的误差值, 且随着预设裂纹宽度的增大, 误差值逐渐减小。细裂纹产生较大误差值的主要原因是, 较小的裂纹宽度导致精确测量传输性能变得更加困难, 即狭窄的裂纹限制了气体流动, 并且其通常具有更明显的几何不规则性, 例如毛细作用或微观不均匀性等, 这些因素导致样品两端压力梯度的测量精度降低^[31]。

还值得注意的是, 当裂纹宽度为 0.1 mm 时, 气体传输测试结果最接近实际裂纹宽度, 误差不足 5%; 当裂纹宽度达到 0.15 mm 时, 气体传输测试仍能保持较高的测量精度, 误差不足 10%; 而当裂纹宽度达到 0.2 mm 时, 由于两端压力梯度不明显, 检测精度显著降低, 误差均超过 110%。这是由于当裂纹较小时, 两端压力差较大, 小的空气振动对内部气流影响不大^[32]; 然而, 随着裂纹增大, 进出口之间的连接变得更直接。因此, 随着裂纹宽度的增加, 数据波动性也上升, 且达到稳定状态的速率更快, 这也与图 3 测试结果非常吻合。基于此, 在进行气体传输测试时, 应综合考虑数据波动性、测试准确性、裂纹尺寸等参数影响。

2.3 气体流量对气体传输的影响

测试了 10、20、30、40 mL/min 和 50 mL/min 等几种气体流量, 探讨了不同流量对气体传输测试

结果的影响, 结果如图 6 所示。数据分析显示, 随着气体流量的增加, 裂纹宽度测试值表现出不同的响应规律。在较低流量下, 气体可能在裂纹内部滞留, 而较高流量下, 气体能更有效地穿过裂纹, 从而提高测量精度。上述结果有助于理解流量条件如何影响气体在裂纹中的传输行为, 以及如何优化测试参数以获得更可靠的数据。当裂纹宽度小于 0.05 mm 时, 5 种气体流量下的误差波动较小(见

图 7)。这是因为裂纹尺寸较小且气体流量相对较低时, 气体能够快速且完全填充裂纹, 从而更准确地测量裂纹特性^[33]。然而, 随着裂纹宽度的增大, 气体流量的选择变得更加重要。较大的裂纹宽度可以在较小的气体流量下迅速达到稳定状态^[34]。在这种情况下, 使用较大流量的气体可能会增加测量误差, 因此在气体传输测试中需要选择适当的流量以确保结果的准确性和可靠性。

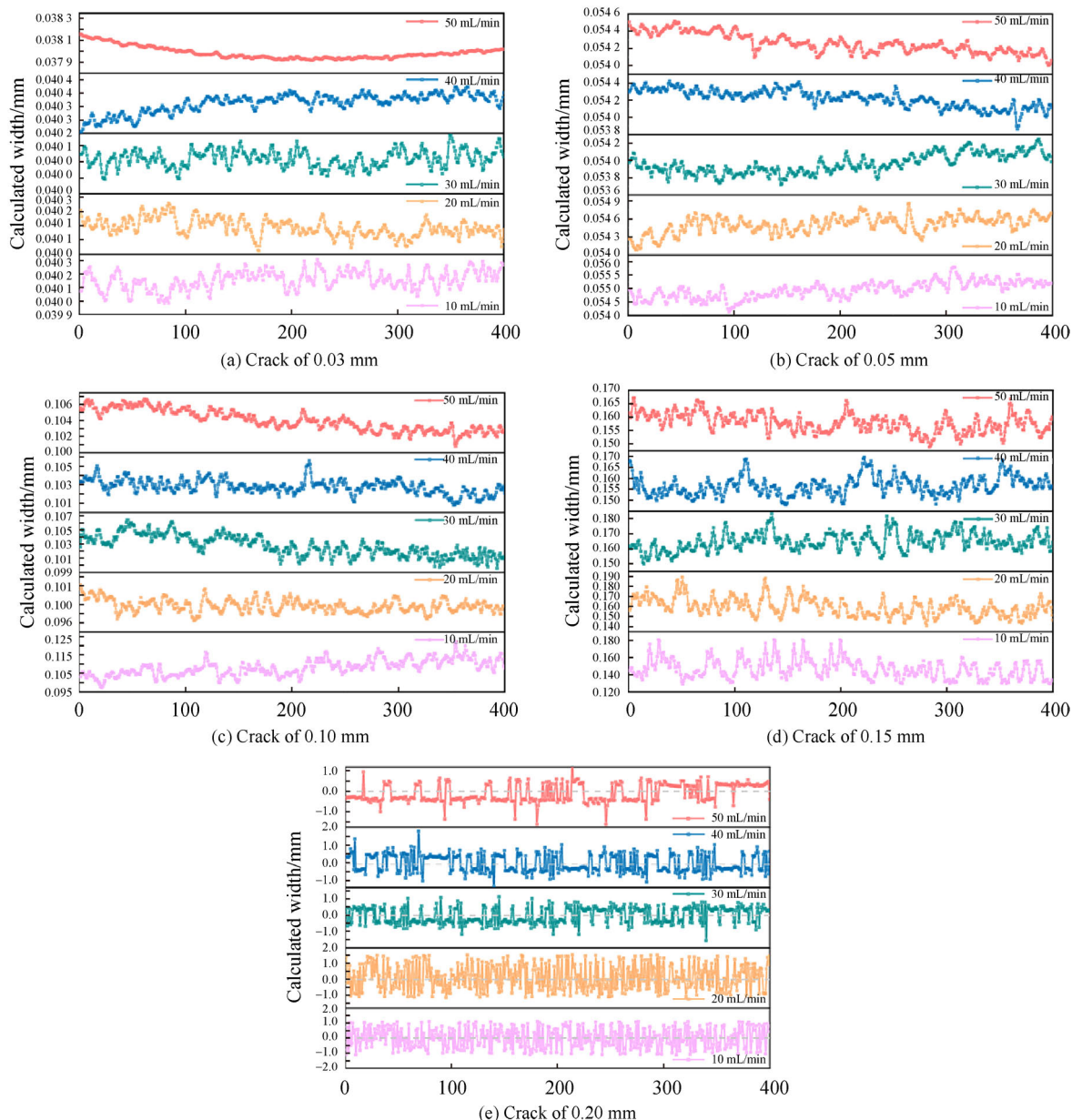


图 4 不同气体流量下裂纹宽度的实时测定结果

Fig. 4 Calculation results of real-time crack widths under different gas flow

对图 7 中的误差值进行分析, 5 组测试结果的最低误差分别为, 气体流量 50 mL/min、0.03 mm 裂纹: 26.67%; 气体流量 40 mL/min、0.05 mm: 8%; 气体流量 30 mL/min、0.1 mm 裂纹: 0.3%; 气体流

量 50 mL/min、0.15 mm 裂纹: 2.47%, 以及气体流量 50 mL/min、0.2 mm 裂纹: 104.5%。对于裂纹宽度为 0.03 mm 的实验组, 当气体流量为 50 mL/min 时, 气体压力达到稳定状态大约需要 180 s, 如图 4a 所示。

这一时间比其他裂纹宽度所需时间的 10~15 倍。这是因为在高流量状态下, 气体需要进入狭窄的裂纹空间, 且需要一定时间来达到稳定; 相较之下, 低流量气流更容易实现稳定。此外, 随着裂纹尺寸的增大, 测试结果的波动幅度也随之上升。然而, 对于相同的裂纹尺寸, 气流的波动幅度变化很小。随着裂纹尺寸的增加, 气体流量增加有助于减小误差 (见图 7)。这是因为, 高气流量可以使气体在裂纹中产生相对稳定的气流, 从而导致更均匀的气流和更稳定的测试结果, 这是高流量气体通过小裂纹时相

对稳定的根本原因。相反, 当气体通过较大的裂纹时, 气体分子之间发生碰撞和反弹, 产生压力波和涡流效应, 从而干扰气体流动并导致结果的不稳定^[35]。结合裂纹宽度以及气体流量可得出, 当裂纹宽度在 0.03 mm 左右时, 宜采用 50 mL/min 气流量; 当裂缝宽度在 0.05 mm 左右时, 宜采用 30 mL/min 气流量; 而当裂纹宽度在 0.10~0.15 mm 时, 宜采用 20 mL/min 气流量。因此, 为确保气体传输测试结果的准确性, 应结合裂纹宽窄程度确定合适的气体流量, 以减小对气体传输的影响。

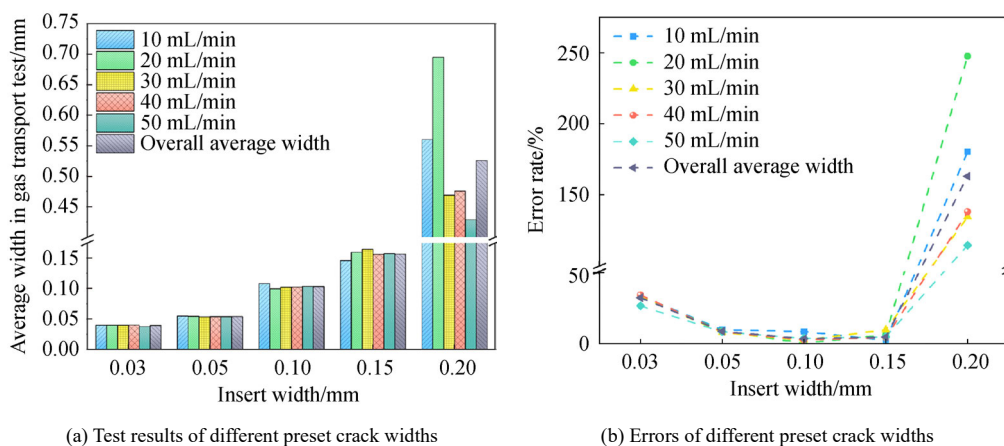


图 5 不同预设裂纹宽度的测试结果及误差

Fig. 5 Test results and errors of different preset crack widths

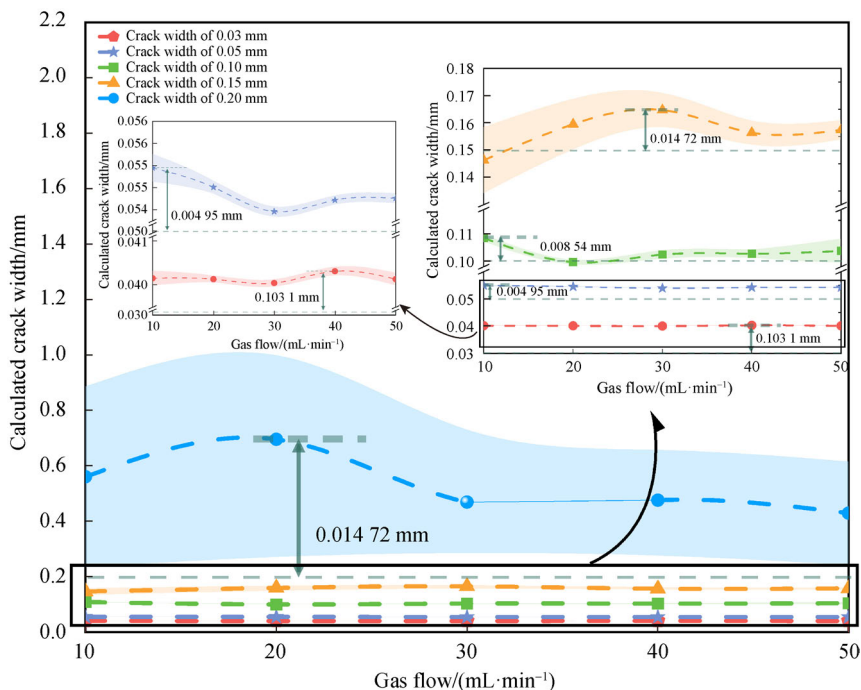


图 6 不同气体流量下裂纹宽度测试结果

Fig. 6 Test results of crack width under different gas flow

2.4 微裂纹宽度数据验证与对比

为了验证气体渗透测试结果的可靠性, 采用精

密光学显微镜对不同样品的 5 个不同区域(每个样品 100 个测试点)进行了测量与统计, 如图 8 及表 1

所示。结果显示, 气体传输测试结果与光学显微镜测量结果之间的差异较小。当预设裂纹为 0.03、0.05、0.10、0.15 mm 和 0.20 mm 时, 光学显微镜统计得到的裂纹平均宽度分别为 0.042 3、0.052 1、0.103 4、0.152 3 mm 和 0.299 2 mm, 对应的误差分别为 41.00%、4.20%、3.40%、1.53%与 49.60%。类似于气体传输测试, 光学显微镜在测量 0.03 mm 与 0.20 mm 裂纹宽度时的误差也较大(40.92%与 49.6%)。这是由于光学显微镜的分辨率受限于光波的波长, 通常在微米级别。当裂纹宽度为 0.2 mm 时, 其无法准确捕捉到裂纹的边缘, 从而导致测量结果准确度的降低。在 0.03~0.15 mm 裂纹宽度内, 随着裂纹宽度的增加, 误差逐渐减小, 且控制在 5% 以内。结果表明, 无论是气体传输测试还是光学显微镜测试, 在较小裂纹宽度下准确测量裂纹尺寸都

较为困难, 而在 0.05~0.15 mm 裂纹宽度下误差显著降低。

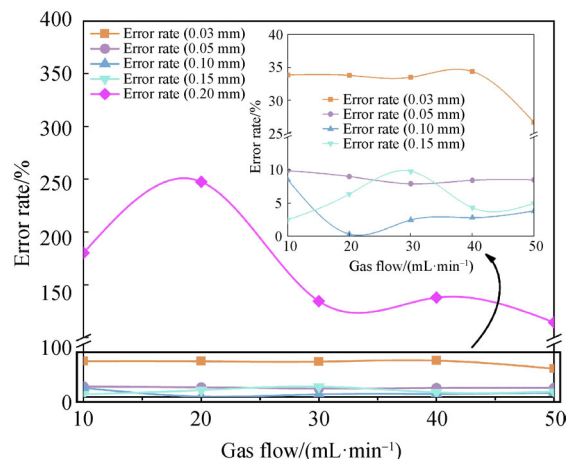


图 7 不同气体流量下测试结果误差分析

Fig. 7 Error analysis of test results under different gas flow

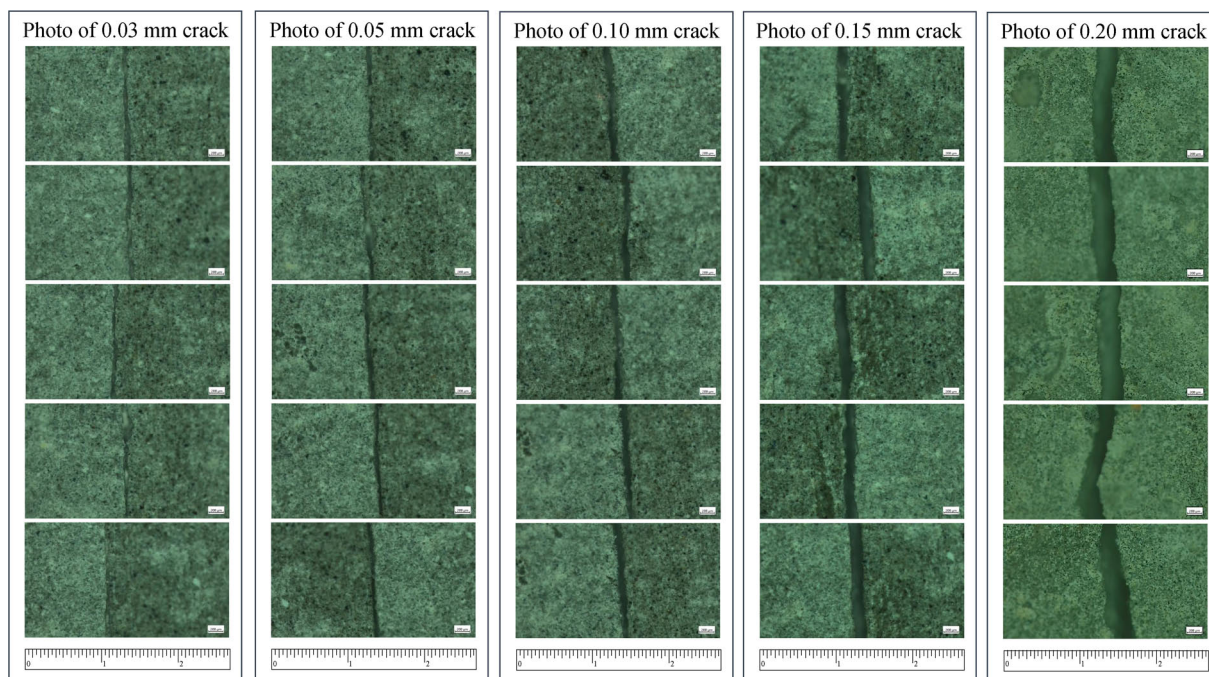


图 8 微裂纹的光学显微镜观测图像

Fig. 8 Optical microscope images of micro-cracks

表 1 不同预设宽度裂纹的光学显微镜测量结果

Table 1 Optical microscope measurement results of cracks with different preset widths

Designs	0.03 mm	0.05 mm	0.10 mm	0.15 mm	0.20 mm
Region 1	0.043 2	0.051 2	0.104 1	0.156 1	0.287 2
Region 2	0.041 8	0.052 4	0.103 1	0.150 2	0.296 7
Region 3	0.045 3	0.053 3	0.103 1	0.151 5	0.310 5
Region 4	0.041 6	0.051 9	0.101 5	0.152 9	0.243 7
Region 5	0.039 4	0.052 0	0.105 5	0.150 6	0.323 0
Average ω	0.042 3	0.052 2	0.103 5	0.152 3	0.292 2

气体传输和光学显微镜测试结果对比如图 9 所示。在裂纹宽度为 0.03、0.05、0.10 mm 和 0.15 mm 时, 气体传输测试与光学显微镜测试测量偏差分别为 5.8%、4.4%、2.2%和 4.6%。从偏差结果比较来看, 随着裂纹尺寸的增大, 测量偏差逐渐减小。而当裂纹宽度超过 0.1 mm 时, 两者之间的偏差则逐渐增大。一方面, 对于光学显微镜而言, 较大的裂纹更容易被观察和测量, 因此其测量误差相对较小; 另一方面, 对于气体传输测试来说, 无论是测量过小还是过大的裂纹都会产生相应的误差。这是因为

无论裂纹宽度如何, 光学显微镜只能测量样品表面的裂纹宽度。而对于水泥基材料而言, 裂纹通常是在内部不规则发展的一种现象。这些内部的不规则性会导致实际裂纹宽度大于预设值, 从而影响测量结果的准确性。此外, 对 0.03 mm 裂纹的测试结果显示, 气体传输测试计算出的平均裂纹宽度为 0.039 8 mm, 与预设值之间的误差约为 30%; 而光学显微镜测得的裂纹宽度为 0.042 3 mm, 误差约为 40.92%。2 种测试方法之间的偏差为 5.8%, 差异并不大。综合以上分析, 2 种测试方法在测量裂纹宽度时存在一定的互补性, 光学显微镜适用于较大裂纹表面宽度值的测量, 而气体传输测试则能够获取样品内部贯穿裂纹的统计平均值。

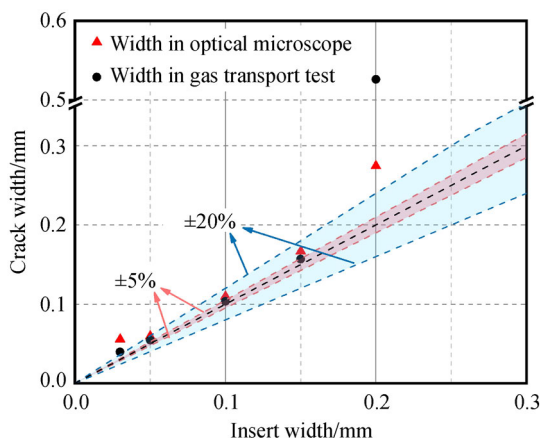


图 9 气体传输法和光学显微镜测试结果误差对比分析

Fig. 9 Error analysis of the results of gas transport test and optical microscope test

2.5 裂纹自愈合过程表征

水泥基材料自愈合前后的压力梯度变化规律如图 10 所示。从图 10 可以看出自愈合后水泥基材料裂纹两端的压力梯度显著增加, 表明裂纹宽度明显减小, 气体阻力变大。根据压力梯度由式(6)计算得到的不同气流条件下的等效裂纹宽度如图 11 所示。结果表明, 由于 SAP 水凝胶的溶胀封堵效应, 0.10 mm 的裂纹自愈合后等效宽度降低至 0.06 mm 左右。与高气流量相比, 在低气流量下(10 mL/min)测得的愈合后的裂纹宽度更小。这一现象应与裂纹中 SAP 水凝胶的阻滞作用有关, 导致低气流量下气体未能在裂纹中有效渗透传输, 并形成较高的压力差。然而, 随着气流量的增加(≥ 20 mL/min), 测试得到的等效裂纹宽度基本处于稳定状态。这是由于高气流量更有助于氩气通过 SAP 水凝胶颗粒之间的间隙并形成通道, 从而进一步增加了样品中的气体流动性, 提高了气体传输效果。

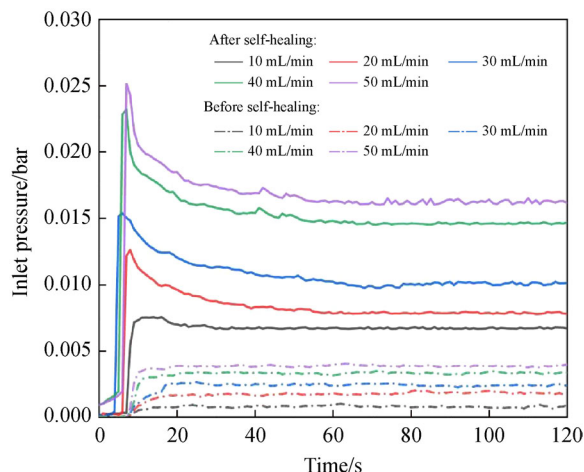


图 10 试样自愈合前后的压力梯度变化规律

Fig. 10 Variation of pressure gradient of samples before and after self-healing

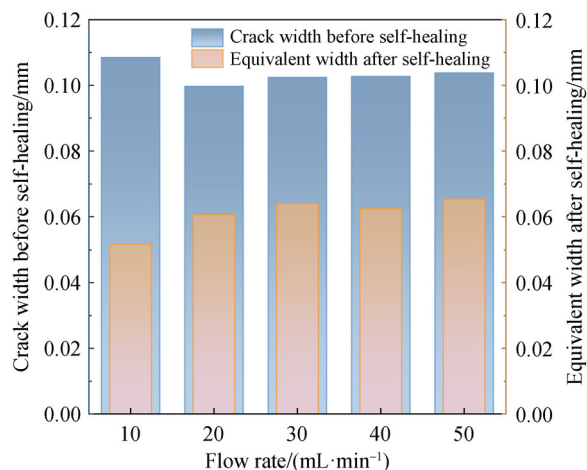


图 11 不同气体流量下的裂纹宽度和等效宽度

Fig. 11 Crack width and equivalent width under different gas flow

通过比较自愈合前后的裂纹宽度, 可以发现 SAP 水凝胶的愈合效应显著降低了裂纹等效宽度, 根据裂纹等效宽度计算得到的愈合率如图 12 所示。在低气体流量下(10 mL/min)计算得到的自愈合率明显高于其他流量值, 这应与吸水溶胀之后水凝胶颗粒增加了气体在裂纹中的传输阻力有关。尽管高气流量及低气体流量下水凝胶颗粒均增加了气体传输阻力, 但高气流量对应更高的气体压力, 从而有助于气体在裂纹及凝胶颗粒之间的传输; 而低气体流量不利于克服上述阻力, 从而造成实验误差的增加。根据图 12 中的测试结果, 气体传输测试裂纹自愈合的合适气体流量范围推荐为 20~50 mL/min, 由此得到的 24 h 平均自愈合率为 39.1%, 表明 SAP 水凝胶在短时间内可有效封堵水泥基材料内部的微裂纹, 起到较好的自愈合封堵效果。

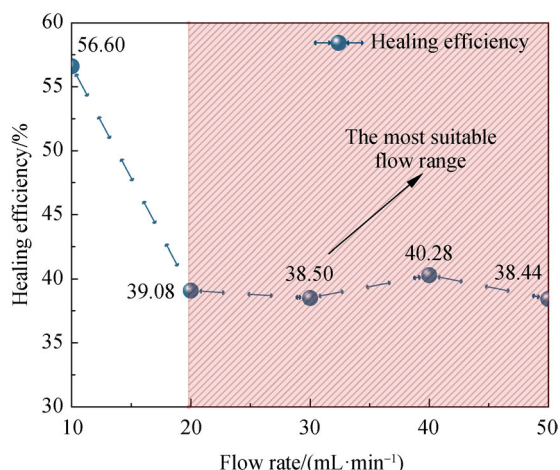


图 12 不同气体流量下的裂纹愈合率

Fig. 12 Crack healing efficiency under different gas flow

3 结论

建立了一种利用气体传输测量裂纹的方法,探讨了传输时间、裂纹宽度范围、气体流量等对气体传输的影响规律,并用于水泥基材料裂纹自愈合表征,对自愈合等效宽度及愈合效率进行了评价。主要结论如下:

1) 气体传输方法可较好量化 0.15 mm 以内的微裂纹,在 20~50 mL/min 的气流量下,误差不足 10%,且测试误差随着裂纹宽度的增大,逐渐减小;气体传输测试能够在短时间内(400 s)准确测出裂纹的裂纹体积等效宽度,具有较好的快捷性和可靠性。

2) 细裂纹产生较大误差值的主要原因是,较小的裂纹宽度导致精确测量传输性能变得更加困难,即狭窄的裂纹限制了气体流动;而当裂纹宽度达到 0.2 mm 的裂纹时,由于两端压力差梯度不明显,检测精度显著降低,误差均超过 110%。

3) 裂纹宽度在 0.03~0.15 mm 时,随着裂纹尺寸的增大,测试结果的波动幅度也随之上升,适当增大气体流量有助于减小测试误差。这是因为,高气体流量可以使气体在裂纹中产生相对稳定的气流,从而导致更均匀的气流和更稳定的测试结果。

4) 气体传输测试裂纹自愈合的合适气体流量范围推荐为 20~50 mL/min,由此得到的 24 h 平均自愈合率为 39.1%,表明 SAP 水凝胶在短时间内可有效封堵水泥基材料内部的微裂纹,降低等效裂纹宽度,起到较好的自愈合封堵效果。

参考文献:

[1] SNOECK D, PEL L, DE BELIE N. Superabsorbent polymers to mitigate plastic drying shrinkage in a cement paste as studied by NMR[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 93: 54–62.

[2] KIM I S, CHOI S Y, CHOI Y S, et al. Effect of internal pores formed by a superabsorbent polymer on durability and drying shrinkage of concrete specimens[J]. *Materials*, 2021, 14(18): 5199.

[3] KIM I S, CHOI S Y, CHOI Y S, et al. An experimental study on absorptivity measurement of superabsorbent polymers (SAP) and effect of SAP on freeze-thaw resistance in mortar specimen[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 267: 120974.

[4] MATAR M G, ADAY A N, SRUBAR W V. Surfactant properties of a biomimetic antifreeze polymer admixture for improved freeze-thaw durability of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 313: 125423.

[5] BESPALHUK K J, DE OLIVEIRA T J C, VALVERDE J V P, et al. Fractal analysis of microstructures in Portland cement pastes—Effect of curing conditions[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 363: 129881.

[6] 曹丽章, 郭丽萍, 臧文洁, 等. 氯盐和硫酸盐交互作用下水泥基材料的破坏机理综述[J]. *材料导报*, 2018, 32(23): 4142–4149.

CAO Yuanzhang, GUO Liping, ZANG Wenjie, et al. *Mater Rep*, 2018, 32(23): 4142–4149.

[7] 李明, 徐文, 王康臣, 等. 高吸水树脂在水泥浆体硬化过程中的释水行为[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(2): 111–116.

LI Ming, XU Wen, WANG Kangchen, et al. *J Build Mater*, 2022, 25(2): 111–116.

[8] TAO J H, HU S B, JI L B. Effect of micromorphology at the fatigue crack tip on the crack growth in electron beam welded Ti-6Al-4V joint[J]. *Mater Charact*, 2016, 120: 185–194.

[9] SCHOELL R, XI L, WEST H, et al. Investigation of the fatigue crack behavior of 304 stainless steels using synchrotron X-ray tomography and diffraction: Influence of the martensite fraction and role of inclusions[J]. *Mater Charact*, 2022, 188: 111903.

[10] LIU H T, YU Y J, LIU H M, et al. Hybrid effects of nano-silica and graphene oxide on mechanical properties and hydration products of oil well cement[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 191: 311–319.

[11] 郭丽萍, 徐燕慧, 陈波, 等. 氯盐溶液干湿循环条件下高延性水泥基复合材料微裂缝的自愈合特性与微观机理[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(7): 874–883.

GUO Liping, XU Yanhui, CHEN Bo, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2019, 47(7): 874–883.

[12] DAS S, STONE D, CONVEY D, et al. Pore- and micro-structural characterization of a novel structural binder based on iron carbonation[J]. *Mater Charact*, 2014, 98: 168–179.

[13] CHEN Y, ÇOPUROĞLU O, ROMERO RODRIGUEZ C, et al. Characterization of air-void systems in 3D printed cementitious materials using optical image scanning and X-ray computed tomography[J]. *Mater Charact*, 2021, 173: 110948.

[14] LEFEVER G, VAN HEMELRIJCK D, SNOECK D, et al. Self-healing assessment of cementitious mortars through ultrasonic monitoring[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 133: 104683.

[15] ZHOU C S, LI K F, PANG X Y. Geometry of crack network and its impact on transport properties of concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2012, 42(9): 1261–1272.

[16] FERRARA L, KRELANI V, MORETTI F. Autogenous healing on the recovery of mechanical performance of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites (HPFRCCs): Part 2—Correlation between healing of mechanical performance and crack sealing[J]. *Cem Concr Compos*, 2016, 73: 299–315.

[17] 桂强, 秦敏峰, 李克非. 水泥基材料气体渗透性研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(10): 1500–1510.

- GUI Qiang, QIN Minfeng, LI Kefei. *J Chin Ceram Soc*, 2015, 43(10): 1500–1510.
- [18] CHEN W, LI K L, WU M M, et al. Influence of pore structure characteristics on the gas permeability of concrete[J]. *J Build Eng*, 2023, 79: 107852.
- [19] 周春圣, 李克非. 含裂纹夹杂多孔材料的渗透性理论与数值分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 150–156.
- ZHOU Chunsheng, LI Kefei. *Eng Mech*, 2013, 30(4): 150–156.
- [20] LEE D K, LIM M H, SHIN K J, et al. Crack width estimation of mortar specimen using gas diffusion experiment[J]. *Materials*, 2019, 12(18): 3003.
- [21] 杨进, 段晓鹏, 邱金胤, 等. 高吸水树脂水凝胶用于水泥基材料裂纹自封堵的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(11): 3015–3024.
- YANG Jin, DUAN Xiaopeng, QIU Jinyin, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2023, 51(11): 3015–3024.
- [22] SOGBOSSI H, VERDIER J, MULTON S. Impact of reinforcement-concrete interfaces and cracking on gas transfer in concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 157: 521–533.
- [23] HASSAN M A, SALEH M A E, TAKAKURA N, et al. Effect of bulge shape on wrinkling formation and strength of stainless steel thin sheet[J]. *Mater Des*, 2012, 42: 37–45.
- [24] MATALLAH M, LA BORDERIE C. 3D numerical modeling of the crack-permeability interaction in fractured concrete[C]//*Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. IA-FraMCoS*, 2016.
- [25] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. *Water Resour Res*, 1969, 5(6): 1273–1289.
- [26] White FM. *Fluid Mechanics*[M]. New York, 4th Ed. 1999: 53–79.
- [27] 李明, 王育江, 王文彬, 等. 高吸水树脂在水泥基材料中的早期吸水与释水行为[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(11): 1595–1601.
- LI Ming, WANG Yujiang, WANG Wenbin, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2016, 44(11): 1595–1601.
- [28] GAO J, JIN P, ZHANG Y Z, et al. Fast-responsive capsule based on two soluble components for self-healing concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 133: 104711.
- [29] LEE K M, KIM H S, LEE D K, et al. Self-healing performance evaluation of concrete incorporating inorganic materials based on a water permeability test[J]. *Materials*, 2021, 14(12): 3202.
- [30] YAO G, ZHANG Y M. Dynamics and stability of an axially moving plate interacting with surrounding airflow[J]. *Meccanica*, 2016, 51(9): 2111–2119.
- [31] CLARKE L V, BAINBRIDGE H, BECK S B M, et al. Measurement of fluid flow rates through cracks[J]. *Int J Press Vessels Pip*, 1997, 71(1): 71–75.
- [32] LI L, WU P, WANG L, et al. Patterns of convection and distribution of binary particles under vibration and airflow[J]. *Phys Fluids*, 2022, 34(11): 3308.
- [33] PLESKUN H, BRÜMMER A. Gas-surface interactions of a Couette-Poiseuille flow in a rectangular channel[J]. *Phys Fluids*, 2022, 34(8): 082009.
- [34] LI D M, YANG R X, CAO H, et al. Experimental study on gas flow in a rough microchannel[J]. *Front Energy Res*, 2022, 10: 863733.
- [35] MEZIOU A, KHAN Z, WASSAR T, et al. Dynamic modeling of two-phase gas/liquid flow in pipelines[J]. *SPE J*, 2019, 24(5): 2239–2263.

Quantitative Characterization Method for Micro-Cracks Based on Gas Transport Volume and Pressure Gradient

YANG Jin^{1,2}, QIU Jinyin¹, CHEN Wei¹, SU Ying^{1,2}, HE Xingyang^{1,2}, ZHANG Qiang³

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Building Waterproof Engineering and Technology Research Center of Hubei Province, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., LTD, Wuhan 430070, China)

Extended Abstract

Introduction Cement-based materials are widely used because of their relatively low cost and strong mechanical properties. However, during hydration hardening and service, such materials are often subjected to multiple effects such as plastic shrinkage, self-shrinkage, drying shrinkage, freezing and thawing cycles, and external loading, which in turn induces the formation of internal microcracks. The emergence and development of internal microcracks in cement-based materials can easily become a penetration channel for erosion media such as sulfate and chloride salts, which adversely affects the stability, durability and safety of the structure. Therefore, the characterization and evaluation of internal cracks in cement-based materials have received extensive attention from scholars at home and abroad. Traditional methods still face certain challenges in measuring the width of internal microcracks in samples quickly and accurately. This paper proposes a micro-crack testing method based on the directional transport of the inert gas argon, which can rapidly and accurately determine the micro-crack width by analyzing the diffusion behavior of the gas in the cracks and the cement matrix through the comprehensive consideration of the sample size and the pressure gradient at both ends.

Methods The cement paste cracking samples with specific crack widths were preset by the insert method, and the preset crack widths were 0.03, 0.05, 0.10, 0.15 mm and 0.20 mm. A cylinder mold with a diameter of $\Phi 50$ mm $\times$ 100 mm was adopted. Through the insert method, steel sheets with different thicknesses were placed in the center of the mold in advance to control the formation of penetrating cracks with different standard widths.

The gas transport system was mainly composed of sample chamber, gas transport control system and computer data acquisition system. During the test, the sample needed to be placed on a closed sample table and connected to the upper and lower outlets through

a thermoplastic tube. The sample room maintained an oil bath environment to ensure sealing. The gas mass flowmeter was adjusted to the required flow rate, so that the gas passed through the device and recorded the pressure gradient changes at different gas flow. The crack width was calculated by Darcy's law.

Results and discussion When the crack width is in the range of 0.03–0.15 mm, the gas transport method can measure the width value more smoothly. When the crack width is 0.1 mm, the gas transport test results are closest to the actual crack width, and the error is less than 5%. When the crack width reaches 0.15 mm, the gas transport test can still maintain a high measurement accuracy, and the error is less than 10%. When the crack width reaches 0.2 mm, the error is more than 110% because the pressure gradient at both ends is not obvious. When the gas flow is 10–50 mL/min, with the increase of crack size, the increase of gas flow helps to reduce the error. Combined with the crack width and gas flow, it can be concluded that when the crack width is about 0.03 mm, the gas flow of 50 mL/min should be adopted; when the crack width is about 0.05 mm, the gas flow of 30 mL/min should be adopted. When the crack width is 0.10–0.15 mm, the gas flow of 20 mL/min should be adopted. In addition, there is a certain complementarity between the gas transport method and the optical microscope test in measuring the crack width. The optical microscope is suitable for the measurement of the width value of the larger crack surface, and the gas transport test can obtain the statistical average value of the penetrating crack inside the sample.

In the self-healing test, with the increase of gas flow (≥ 20 mL/min), the equivalent crack width obtained by the test is basically in a stable state. This is because the high gas flow is more conducive to the passage of argon through the gap between SAP hydrogel particles and the formation of channels, thereby further increasing the gas fluidity in the sample and improving the gas transport effect. By comparing the crack width before and after self-healing, it can be found that the healing effect of SAP hydrogel significantly reduces the crack equivalent width, and the healing rate calculated according to the crack equivalent width.

Conclusions At the gas flow of 20–50 mL/min, the error is less than 10%, and the test error gradually decreases with the increase of crack width. The gas transport test can accurately measure the crack volume equivalent width of the crack in a short time (400 s), and has good rapidity and reliability. When the crack width reaches 0.2 mm, the detection accuracy is significantly reduced because the pressure difference gradient at both ends is not obvious, and the error is more than 110%. When the crack width is 0.03–0.15 mm, the fluctuation range of the test results increases with the increase of the crack size, and the appropriate increase of the gas flow is helpful to reduce the test error. Therefore, the gas transport method can better quantify the microcracks within 0.15 mm. The suitable gas flow range for crack self-healing in gas transport test is recommended to be 20–50 mL/min, and the average self-healing rate of 24 h is 39.1%, indicating that SAP hydrogel can effectively seal the microcracks inside cement-based materials in a short time, reduce the equivalent crack width, and play a good self-healing sealing effect.

Keywords cement-based material; micro-crack; gas transport; self-healing